

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAITRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE
M. Ing.

PAR
Moussa BA

RÉALISATION D'UN SIMULATEUR SOLAIRE D₆₅ A PARTIR DE DIODES
ÉLECTROLUMINESCENTES A SEMI-CONDUCTEURS POUR DES
APPLICATIONS EN PHOTOVOLTAÏQUE

MONTREAL, LE 8 JUILLET 2014

©Tous droits réservés, Moussa BA 2014

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

M. Sylvain G. Cloutier, directeur de mémoire
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

Mme Véronique Françoise, codirectrice de mémoire
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Ghyslain Gagnon, président du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

Mme Christine Tremblay, membre du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 2 JUIN 2014

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je remercie M. Sylvain G. Cloutier, Ph.D, pour m'avoir permis de réaliser ce projet au sein de son laboratoire de recherche: Laboratoire de Caractérisation (LC).

Mes remerciements vont à ma co-directrice Mme Véronique François, PhD et professeur à l'ÉTS, pour sa disponibilité, ses conseils précieux dans le cadre de ce travail.

Merci à Nelson Landry, technicien au NOMAD (ÉTS), pour son ingéniosité et sa technicité.

Je veux remercier Luis Felipe Reyes Gerlein pour son aide particulière tout au long de ce projet ainsi que François R. Moisan et François-Xavier Fortier sans qui ce projet ne serait pas ce qu'il est.

Grand merci aussi à tous ces jeunes chercheurs du groupe du LC avec qui des échanges tant sur le travail que sur tout autre sujet intéressant m'ont permis d'apprendre toujours plus et d'éclairer mes idées le tout dans une ambiance des plus conviviales et constructives.

Mes sincères remerciements à monsieur Mamadou Cissokho et à sa famille pour avoir parrainé mon séjour au Canada durant toute la période de mes études qui ont abouti à la réalisation de ce travail.

Je remercie également madame Mimie Sané pour son soutien permanent tout au long de ce travail.

Merci au gouvernement du Québec qui, grâce à une entente avec le gouvernement du Sénégal, m'a permis de bénéficier d'une bourse d'exemption pour mon programme d'études.

Je souhaite remercier ma famille; en particulier mon épouse Fatou BA qui a su s'occuper, sans faute, de mes filles Aminata et Fatoumata. Merci à ma mère pour son appui sans bornes.

RÉALISATION D'UN SIMULATEUR SOLAIRE D₆₅ A PARTIR DE DIODES ÉLECTROLUMINESCENTES A SEMI-CONDUCTEURS POUR DES APPLICATIONS EN PHOTOVOLTAÏQUE

Moussa BA

RÉSUMÉ

L'objectif de ce travail est de réaliser un simulateur solaire par le biais d'une combinaison de diodes électroluminescentes (DELs) et d'une technologie très simple pour des applications de tests et de caractérisation de cellules solaires photovoltaïques. Le marché photovoltaïque dispose de simulateurs solaires performants mais leur coût exorbitant et leurs dimensions limitent leur utilisation à grande échelle. L'approche adoptée dans ce travail nous a permis de miniaturiser un simulateur solaire dont les caractéristiques spectrales et colorimétriques répondent aux différentes spécifications standards établies pour un simulateur solaire en général et pour des applications photovoltaïques en particulier pour un investissement de moins de 500 dollars. Les résultats obtenus montrent des caractéristiques telles que la température de couleur proximale (TCP), le match spectrale, l'uniformité spectrale ainsi que l'instabilité temporelle de l'irradiance qui illustrent parfaitement le modèle d'un simulateur solaire haut de gamme pour la caractérisation de cellules solaires photovoltaïques dans le domaine spectral 350 nm - 900 nm. Certes les spécifications de l'ASTM, de l'IEC et de l'IJS relatives aux simulateurs solaires sont établies entre 400 nm et 1100 nm mais le domaine du visible de la lumière du jour renferme une énergie suffisante pour un fonctionnement optimal des systèmes photovoltaïques et bien d'autres applications spécifiques. La densité spatiale de puissance du simulateur solaire de classe A final (0.927 mW/cm^2) est très faible par rapport à la moyenne indiquée dans les standards (100 mW/cm^2). La résolution de ce problème relève d'une question d'ingénierie et, par conséquent, ne remet nullement en cause la qualité du travail effectué.

Mots clés: DELs à semiconducteurs, sources blanches, cellules solaires, énergie photovoltaïque

REALIZATION OF A D₆₅ SOLAR SIMULATOR WITH SEMICONDUCTOR LIGHT-EMITTING DIODES FOR PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS

Moussa BA

ABSTRACT

The objective of this work is to provide a solar simulator through of a combination of light-emitting diodes (LEDs) and through of a very simple technology for test and characterization applications of photovoltaic solar cells. The photovoltaic market offers powerful solar simulators but their exorbitant cost and size limit their widespread use. The approach in this work has allowed us to miniaturize a solar simulator who's spectral and colorimetric characteristics correspond to different standard specifications for a solar simulator in general and for photovoltaic applications especially for an investment of less than \$500. The results show characteristics such as correlated color temperature (CCT), spectral match, spatial uniformity and temporal instability of irradiance that perfectly illustrate the model of an upscale solar simulator for the characterization of photovoltaic solar cells in the 350 nm to 900 nm spectral range. While the specifications of ASTM, IEC and IJS on solar simulators are established between 400 nm and 1100 nm, the visible range of the daylight contains sufficient enough energy for optimal performance of photovoltaic systems and many other specific applications. The spatial power density of the A class solar simulator made (0.927 mW/cm²) is very low compared to the average (100 mW/cm²) shown in standards. Solving this problem is an engineering matter and, therefore, it does not compromise the quality of this work.

Keywords: LEDs semiconductors, white sources, solar cells, photovoltaic.

TABLE DES MATIÈRES

| | Page |
|--|------|
| INTRODUCTION | 1 |
| CHAPITRE 1 SYSTÈME VISUEL HUMAIN ET LES GRANDEURS PHOTOMETRIQUES | 7 |
| 1.1 Le système visuel humain | 7 |
| 1.1.1 L'œil humain et la vision | 7 |
| 1.1.1.1 Anatomie de l'œil | 7 |
| 1.1.1.2 La rétine | 8 |
| 1.1.1.3 Les éléments photosensibles | 10 |
| 1.1.2 Sensibilité spectrale de l'œil humain | 12 |
| 1.2 Les grandeurs photométriques | 13 |
| 1.2.1 Flux lumineux | 15 |
| 1.2.2 Intensité lumineuse | 15 |
| 1.2.3 Luminance..... | 16 |
| 1.2.4 Efficacité lumineuse du rayonnement..... | 16 |
| 1.2.5 Distribution spectrale relative de puissance (SPD) ou d'énergie..... | 17 |
| 1.2.6 Rendements quantiques | 18 |
| 1.2.6.1 Rendement quantique externe..... | 18 |
| 1.2.6.2 Rendement quantique interne | 18 |
| CHAPITRE 2 COLORIMETRIE | 19 |
| 2.1 Introduction | 19 |
| 2.2 Lois de Grassmann | 19 |
| 2.3 Expérience d'égalisation des couleurs | 20 |
| 2.4 Coordonnées et diagrammes de chromaticité..... | 21 |
| 2.4.1 Valeurs tri-stimulus R, V, B | 21 |
| 2.4.2 Observateur de référence de la CIE de 1931: Fonctions d'accord de couleurs | 22 |
| 2.4.3 Coordonnées chromaticité et diagramme de chromaticité CIE 1931 | 26 |
| 2.4.3.1 Coordonnées de chromaticité..... | 26 |
| 2.4.3.2 Diagrammes de chromaticité CIE 1931 | 27 |
| 2.4.3.3 Diagrammes de chromaticité uniformes: ellipses de McAdam | 28 |
| CHAPITRE 3 ILLUMINANTS ET SOURCES DE LA CIE..... | 31 |
| 3.1 Introduction | 31 |
| 3.2 Température de couleur..... | 31 |
| 3.3 Illuminants de la CIE..... | 34 |
| 3.3.1 Notion d'illuminant..... | 34 |
| 3.3.2 Illuminants de la CIE | 34 |
| 3.3.2.1 Illuminants classiques de la CIE | 34 |
| 3.3.2.2 Illuminants de type lumière du jour | 36 |

| | | |
|---|--|----|
| 3.4 | Sources standards de la CIE | 44 |
| 3.4.1 | Source artificielle simulant l'illuminant normalisée A | 45 |
| 3.4.2 | Sources simulant l'illuminant D ₆₅ de la CIE..... | 45 |
| CHAPITRE 4 SIMULATEURS SOLAIRES ET LEURS TECHNIQUES DE CARACTERISATION | | 47 |
| 4.1 | Introduction | 47 |
| 4.2 | Présentation | 47 |
| 4.3 | Caractéristiques d'un simulateur solaire | 49 |
| 4.3.1 | Zone de couverture d'une surface test | 49 |
| 4.3.2 | Mode de fonctionnement | 49 |
| 4.3.3 | Profil spectral d'un simulateur solaire | 50 |
| 4.3.3.1 | Spectres de référence | 50 |
| 4.3.3.2 | "Spectral match" | 52 |
| 4.3.3.3 | Non-uniformité spatiale de l'irradiance | 52 |
| 4.3.3.4 | Instabilité temporelle de l'irradiance | 53 |
| 4.4 | Techniques de caractérisation et classification des simulateurs solaires | 53 |
| 4.4.1 | Techniques de caractérisation | 53 |
| 4.4.1.1 | Méthodes quantitatives | 54 |
| 4.4.1.2 | Méthode spectrale: Distribution de l'irradiance spectrale | 60 |
| 4.4.2 | Classification des simulateurs solaires..... | 60 |
| CHAPITRE 5 MATERIEL ET METHODES | | 63 |
| 5.1 | Introduction | 63 |
| 5.1.1 | Structure d'une DEL à semi-conducteurs | 63 |
| 5.1.2 | Mouvement des charges et génération de la lumière | 64 |
| 5.2 | Propriétés photométriques des DELs | 65 |
| 5.2.1 | Intensité lumineuse des DELs..... | 65 |
| 5.2.2 | Luminosité des DELs..... | 66 |
| 5.2.3 | Flux lumineux des DELs | 66 |
| 5.2.4 | Efficacité lumineuse de radiation (LER) des DELs..... | 67 |
| 5.2.5 | Couleur des DELs | 68 |
| 5.3 | Contraintes de température et stabilité des DELs | 70 |
| 5.4 | Dispositif expérimental | 72 |
| 5.4.1 | Lot de (DELs) | 72 |
| 5.4.2 | Le circuit d'alimentation des DELs | 74 |
| 5.4.3 | Le système d'acquisition des données : le logiciel SpectraSuite™ | 75 |
| 5.5 | Vérification de la validité de SpectraSuite™ | 77 |
| 5.5.1 | Certification de SpectraSuite™ | 77 |
| 5.5.2 | Caractérisation d'un pointeur laser vert de longueur connue | 77 |
| 5.6 | Méthodologie | 78 |
| 5.6.1 | Approche expérimentale | 78 |
| 5.6.2 | Poids de chacune des composantes DELs | 78 |

| | | |
|------------|---|-----|
| CHAPITRE 6 | RÉALISATION D'UN SIMULATEUR SOLAIRE D_{65} A BASE DE DIODES ELECTROLUMINESCENTES | 83 |
| 6.1 | Méthodes de réalisation de sources blanches avec des DELs | 83 |
| 6.1.1 | Génération de lumière blanche par conversion du phosphore | 83 |
| 6.1.2 | Génération de lumière blanche par une DEL à puce de lumière blanche: méthode dite de Schubert ou de recyclage de photons | 84 |
| 6.1.3 | Génération de lumière blanche par combinaison de différentes couleurs | 85 |
| 6.2 | Réalisation du simulateur solaire D_{65} | 86 |
| 6.2.1 | Simulateur solaire D_{65} à huit DELs | 86 |
| 6.2.2 | Simulateur solaire D_{65} à dix LEDs | 91 |
| 6.2.3 | Simulateur solaire D_{65} douze DELs | 93 |
| 6.2.3.1 | Non-uniformité spatiale de l'irradiance | 96 |
| 6.2.3.2 | Évaluation de l'instabilité temporelle de l'irradiance | 101 |
| 6.2.4 | Simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs | 102 |
| 6.2.4.1 | Lissage du profil spectral de la SPD du simulateur solaire à quatorze DELs | 106 |
| 6.2.4.2 | Non-uniformité spatiale de l'irradiance | 107 |
| 6.2.4.3 | Évaluation de l'instabilité temporelle de l'irradiance | 108 |
| 6.2.4.4 | Paramètres calibrations du simulateur solaire | 109 |
| 6.2.4.5 | Contribution spectrale de la DEL W54L5111 | 110 |
| 6.2.4.6 | Mesure de densité de puissance sur une surface test distante de 10 cm du simulateur solaire D_{65} | 111 |
| 6.2.4.7 | Position du simulateur par rapport aux loci de Planck et des phases de la lumière naturelle du jour dans le système CIE (u, v) 1960 | 115 |
| CONCLUSION | | 117 |
| ANNEXE I | SPÉCIFICITÉS DES ILLUMINANTS FLUORESCENTS STANDARDS | 119 |
| ANNEXE II | LOWESS SMOOTHED $S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$ AND $S_2(\lambda)$ EIGENVECTOR | 123 |
| ANNEXE III | LOWESS SMOOTHED D_{50} , D_{60} , D_{65} , D_{70} , D_{75} , ID_{50} AND ID_{65} SPECTRA | 137 |
| ANNEXE IV | SPECTRAL POWER DISTRIBUTION OF SPRAGUE INTERPOLATED DAYLIGHT ILLUMINANTS: D_{50} , D_{55} , D_{60} , D_{65} , D_{70} and D_{75} | 151 |
| ANNEXE V | CALCULATION OF THE SPECTRAL POWER DISTRIBUTION OF A PHASE OF DAYLIGHT WITH ARBITRARY EQUALLY SPACED SAMPLING | 165 |
| ANNEXE VI | CERTIFICAT DE CALIBRATION DE SPECTRASUITE | 167 |

| | |
|---|-----|
| ANNEXE VII QUELQUES SECTIONS DES FICHES TECHNIQUES DES DELs COMPOSANT LE SIMULATEUR SOLAIRE D65 A QUATORZE DELs | 169 |
| LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... | 207 |

LISTE DES TABLEAUX

| | Page |
|-------------|---|
| Tableau 1.1 | Quelques valeurs de la fonction de l'efficacité spectrale relative $V(\lambda)$ à certaines valeurs de longueur d'onde.....13 |
| Tableau 3.1 | Impression liée à la température de couleur proximale dans le diagramme de chromaticité CIE (x, y) 193133 |
| Tableau 3.2 | Illuminants classiques de la CIE36 |
| Tableau 3.3 | Caractéristiques colorimétriques des illuminants de type "lumière du jour"40 |
| Tableau 4.1 | Distribution spectrale de l'irradiance d'un spectre de référence pour quelques modes, donnée en pourcentage par intervalles de longueurs d'onde de 100 nm, telle qu'illustré dans la norme ASTM E927-1051 |
| Tableau 4.2 | Échantillons de couleur tests de la CIE utilisés pour le calcul du CRI.....55 |
| Tableau 4.3 | Appréciation du rendu des couleurs en fonction de la valeur du CRI56 |
| Tableau 4.4 | Catégorisation des sources sur la base de l'indice de métamerisme.....60 |
| Tableau 4.5 | International standards for solar simulation performance61 |
| Tableau 5.1 | Sommaire des projections sur les performances et le prix des DELs blanches froides et blanches chaudes.....67 |
| Tableau 5.2 | Les différentes composantes DELs du simulateur solaire D_{65}73 |
| Tableau 5.3 | Caractéristiques de la source LS-1-CAL76 |
| Tableau 5.4 | DELs composant le simulateur solaire D_{65} dont la variation de l'intensité lumineuse influe considérablement sur les caractéristiques colorimétriques79 |
| Tableau 5.5 | DELs dont la variation de l'intensité lumineuse influe faiblement sur les caractéristiques colorimétriques du simulateur solaire D_{65}81 |
| Tableau 6.1 | Référence des huit DELs composant le simulateur solaire D_{65}87 |
| Tableau 6.2 | Comparaison des caractéristiques colorimétriques du simulateur solaire D_{65} à huit DELs à celles de l'illuminant normalisé D_{65} de la CIE90 |

| | |
|-------------|---|
| Tableau 6.3 | Classes du simulateur solaire D_{65} à douze DELs du point de vue uniformité spatiale de l'irradiance en fonction de la distance du simulateur à la surface test et de l'aire de la surface illuminée 100 |
| Tableau 6.4 | Références des quatorze DELs composant le simulateur solaire D_{65} 103 |
| Tableau 6.5 | Classe du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs du point de vue uniformité spatiale de l'irradiance en fonction de l'aire d'une surface teste distante de 10 cm 108 |
| Tableau 6.6 | Puissance optique totale P_{opt} du simulateur solaire à quatorze DELs et la contribution en puissance (en %) de chacune de ses composantes DELs..... 110 |
| Tableau 6.7 | Densité spatiale de puissance du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs sur différentes sections de surface en fonction du rayon d'illumination d'une surface test distante de 10 cm 113 |
| Tableau 6.8 | Coordonnées de chromaticité du simulateur solaire à quatorze DELs comparées à celles de l'illuminant normalisé D_{65} dans les systèmes CIE (x, y) 1931 et CIE (u, v) 1960 115 |

LISTE DES FIGURES

| | Page |
|------------|--|
| Figure 1.1 | Coupe horizontale de l'œil.....8 |
| Figure 1.2 | Diagramme simplifié de l'organisation de la rétine.....9 |
| Figure 1.3 | a. Distribution des cônes et des bâtonnets dans la rétine b. Aperçu de l'échantillonnage des photorécepteurs sur la rétine10 |
| Figure 1.4 | Sensibilité spectrale des différents types de récepteurs à la longueur d'onde de la lumière.....11 |
| Figure 1.5 | Fonctions d'efficacité lumineuse relative spectrale photopique $V(\lambda)$ et scotopique $V'(\lambda)$ normalisées tel que spécifiées par la CIE 193114 |
| Figure 1.6 | Différents niveaux de conversion de l'énergie au sein d'une DEL16 |
| Figure 2.1 | Expérience classique pour la reproduction d'une couleur blanche.....21 |
| Figure 2.2 | Fonctions spectrales standard $r(\lambda)$, $v(\lambda)$ et $b(\lambda)$ du système CIE-RVB 1931 à 2°.23 |
| Figure 2.3 | Fonctions standards d'accord de couleurs $x(\lambda)$, $y(\lambda)$ et $z(\lambda)$ et $x_{10}(\lambda)$, $y_{10}(\lambda)$ et $z_{10}(\lambda)$ des systèmes respectifs CIE XYZ 1931 et CIE XYZ 1964.....26 |
| Figure 2.4 | Diagramme de chromaticité CIE (x,y) 1931 à 2°28 |
| Figure 2.5 | Ellipses de MacAdam29 |
| Figure 2.6 | Allure des ellipses de MacAdam dans le diagramme CIE (u' , v') 1976 ...30 |
| Figure 3.1 | Locus de Planck avec quelques isothermes dans le diagramme de chromaticité CIE (u' , v') 1976.....32 |
| Figure 3.2 | Profils spectraux des SPDs des illuminants A, B, C et E de la CIE35 |
| Figure 3.3 | Position du locus des illuminants de la série D par rapport à celui de Planck dans le système CIE 1960 UCS37 |
| Figure 3.4 | Profils spectraux des fonctions $S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$ et $S_2(\lambda)$42 |
| Figure 3.5 | Profil spectral polissé de la SPD de l'illuminant normalisé D_{65} de la CIE42 |
| Figure 3.6 | Concept de sources et d'illuminants44 |

| | |
|-------------|---|
| Figure 4.1 | Model 94063A de la gamme Sol3A (insert haut gauche) de simulateurs solaires d'Oriel Instruments 48 |
| Figure 4.2 | Dimensions en pouces (mm) du model 94063A de la gamme Sol3A de simulateur solaire d'Oriel Instruments..... 48 |
| Figure 4.3 | Dépendance du mode d'une phase de lumière du jour en fonction de l'inclinaison du rayon solaire par rapport au zénith..... 51 |
| Figure 5.1 | Structure énergétique d'un semi-conducteur à bande interdite directe dans l'espace des phases 64 |
| Figure 5.2 | Diagramme simplifié d'une jonction p-n d'une diode à semi-conducteurs montrant le mouvement des électrons et des trous lorsqu'une tension positive est appliquée 65 |
| Figure 5.3 | Dépendance du flux lumineux ϕ_{lum} et du rendement lumineux externe η_L d'une DEL blanche ultra puissante entre 20 et 1000 mA. ϕ_v , V_f , η_L , T_{cp} et (x, y) à 350 mA avaient pour valeurs respectives 203 lm, 3.18 V, 183 lm W ⁻¹ 4700 K et (0.36, 0.39) 66 |
| Figure 5.4 | Énergie de la bande interdite et longueurs d'onde d'émission pour quelques semi-conducteurs élémentaires et systèmes binaires. Les barres grises correspondent aux semi-conducteurs à bande interdite directe et celles sombres aux semi-conducteurs à bande interdite indirecte. La courbe continue représente la sensibilité de l'œil humain, $V(\lambda)$ exprimée ici en fonction de l'énergie de la bande interdite 68 |
| Figure 5.5 | Puissances de sortie normalisées en fonction de la température de jonction mesurée à des densités de courant variant de 5 à 50 A.cm ⁻² pour des puces DELs de différentes dimensions 70 |
| Figure 5.6 | Une DEL produit une lumière sensiblement quasi-monochromatique mais son intensité et sa largeur spectrale dépendent fortement de la température de la jonction..... 71 |
| Figure 5.7 | Dépendance de la durée de vie d'une DEL en fonction du courant d'alimentation et de la température de la jonction..... 72 |
| Figure 5.8 | Circuit d'alimentation en courant a. pour les mono-DELs, b. pour les multi-DELs 75 |
| Figure 5.9 | Bouchon support des DELs à l'entrée de la sphère intégratrice : a. vue de face et b. vue de de profil 76 |
| Figure 5.10 | Montage expérimental de calibration du spectromètre Jaz..... 76 |
| Figure 6.1 | Génération de lumière blanche par conversion du phosphore 84 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Figure 6.2 | Génération de lumière blanche par une DEL à puce de lumière blanche | 84 |
| Figure 6.3 | Génération de lumière blanche par une combinaison de DELs de couleurs différentes | 85 |
| Figure 6.4 | Montage expérimental du processus de calibration du simulateur solaire D ₆₅ | 88 |
| Figure 6.5 | Schéma simplifié du montage expérimental utilisé pour la calibration du simulateur solaire D ₆₅ | 88 |
| Figure 6.6 | Profil spectral de la SPD du simulateur D ₆₅ solaire à huit DELs comparé à celui de la SPD de l'illuminant normalisé D ₆₅ de la CIE | 89 |
| Figure 6.7 | "Spectral match" de l'irradiance du simulateur solaire D ₆₅ à huit DELs évalué par rapport à la norme E927 10 d'ASTM..... | 90 |
| Figure 6.8 | Profil spectral de la SPD du simulateur D ₆₅ solaire à dix DELs comparé à celui de la DEL de l'illuminant normalisé D ₆₅ de la CIE..... | 92 |
| Figure 6.9 | "Spectral match" de l'irradiance du simulateur solaire D ₆₅ à dix DELs évalué par rapport à la norme E927 10 d'ASTM | 93 |
| Figure 6.10 | Caractéristiques colorimétriques du simulateur solaire D ₆₅ à douze DELs | 94 |
| Figure 6.11 | Profil spectral de la SPD du simulateur D ₆₅ solaire à douze DELs comparé à celui de la SPD de l'illuminant normalisé D ₆₅ de la CIE | 95 |
| Figure 6.12 | "Spectral match" de l'irradiance du simulateur solaire D ₆₅ à douze DELs évalué par rapport à la norme E927 10 d'ASTM | 96 |
| Figure 6.13 | Dispositif expérimental pour la mesure de la non-uniformité spatiale de l'irradiance du simulateur solaire à douze DELs | 97 |
| Figure 6.14 | Technique d'évaluation de la non-uniformité spatiale de l'irradiance du simulateur solaire D ₆₅ | 97 |
| Figure 6.15 | Non-uniformité spatiale de l'irradiance du simulateur solaire D ₆₅ à douze DELs sur une surface test située à 10 cm..... | 98 |
| Figure 6.16 | Non-uniformité spatiale de l'irradiance du simulateur solaire D ₆₅ à douze DELs sur une surface test située à 15 cm..... | 99 |
| Figure 6.17 | Instabilité temporelle de l'irradiance du simulateur solaire D ₆₅ à douze DELs mesurée sur un intervalle de temps de 300 s par pas de 5 ms | 101 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Figure 6.18 | Caractéristiques colorimétriques du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs | 104 |
| Figure 6.19 | Profil spectral de la SPD du simulateur D_{65} solaire à quatorze DELs comparé à celui de la SPD de l'illuminant normalisé D_{65} de la CIE ... | 105 |
| Figure 6.20 | "Spectral match" de l'irradiance du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs évalué par rapport à la norme E927 10 d'ASTM | 105 |
| Figure 6.21 | Profil spectral lissé de la SPD du simulateur D_{65} à quatorze DELs en tenant compte des ellipses de MacAdam comparé à celui de la SPD de l'illuminant D_{65} | 106 |
| Figure 6.22 | Non-uniformité spatiale de l'irradiance du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs sur une surface teste située à 10 cm | 107 |
| Figure 6.23 | Instabilité temporelle de l'irradiance du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs mesurée sur un intervalle de temps de 300 s par pas de 5 ms | 109 |
| Figure 6.24 | Contribution en SPD de la DEL W54L5111P sous une alimentation d'un courant de 0.31 mA et à la température de la salle dans la SPD du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs..... | 111 |
| Figure 6.25 | Montage de la mesure de la densité spatiale de puissance du simulateur solaire à quatorze DELs sur une surface test distante de 10 cm | 113 |
| Figure 6.26 | Variation de la densité spatiale de puissance du simulateur D_{65} à quatorze DELs en fonction du rayon d'illumination r_i sur une surface test distante de 10 cm | 114 |
| Figure 6.27 | Position du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs par rapport aux loci de Planck et des phases de la lumière naturelle du jour dans le système CIE (u, v) 1960 | 116 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

| | |
|---------------------------|---|
| ASTM | American society for testing and materials |
| AM 1.5G | Mode d'ensoleillement AM1.5 Global |
| c | Célérité de la lumière dans le vide |
| CCT | Correlated color temperature (ou Température de couleur proximale : TCP) |
| CIE | Commission internationale de l'éclairage |
| CIE $*a*b*$ | CIE color espace CIE $*a*b*$ |
| CIE $*u*v*$ | CIE color espace CIE $*u*v*$ |
| CIE UVW | CIE color espace CIE UVW |
| CREE | Compagnie multinationale dans le domaine la fabrication de LEDs à semiconducteurs |
| CRI | Color rendering index |
| D | Distance entre la source et le détecteur |
| DIN | Deutsches Institut Fur Normung |
| $E(\lambda)$ | Énergie des photons émis à la longueur d'onde λ |
| E_C | Énergie de la bande de conduction |
| E_g | Énergie de la bande interdite |
| E_V | Énergie de la bande de valence |
| E_{\max} | Irradiance spectrale maximale |
| E_{\min} | Irradiance spectrale minimale |
| FWHM | Full width half maximum |
| γ | Facteur de perte |
| $\phi(\lambda)$ | Flux de photons |
| $\phi_{\text{détecteur}}$ | Flux reçu par le détecteur |

| | |
|------------------------|---|
| Φ_{lum} | Flux lumineux |
| Φ_{R} | Flux rayonné |
| h | Constante Planck |
| IPTS | International practical temperature scale |
| I | Irradiance spectrale |
| I_0 | Irradiance spectrale de référence |
| I_v | Intensité lumineuse |
| IEC | International Electrical Commission |
| ipRGC | Intrinsically photosensitive retinal ganglion cells |
| I_s | Intensité de courant traversant la source |
| InGaN | Indium gallium nitride |
| IR | Infrarouge |
| IRC | Indice de rendu de couleur |
| ISO | International of standard organization |
| JIS | Japanese industrial standard |
| k | Constante de Boltzmann |
| k_B | Constante de Stephan-Boltzmann |
| L | Luminance en watt.m ⁻² |
| LC | Laboratoire de caractérisation |
| λ | Longueur du rayonnement |
| λ_d | Longueur dominante |
| λ_{max} | Longueur d'onde maximale |
| λ_{min} | Longueur d'onde minimale |
| λ_{pic} | Longueur d'onde pic |

| | |
|----------------|---|
| LED (s) | Light Emitting diodes |
| $L_e(\lambda)$ | Luminance énergétique spectrale en $\text{watt.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\text{nm}^{-1}$ |
| LER | Luminous efficiency of radiation |
| MI | Indice de métamérisme (Metamerism index) |
| MI_{uv} | Indice de métamérisme dans le spectre ultraviolet |
| MI_{vis} | Indice de métamérisme dans le spectre visible |
| $M_1; M_2$ | Facteurs dépendant des valeurs de coordonnées de chromaticité x_D et y_D |
| $N(\lambda)$ | Flux de photons émis à la longueur d'onde λ |
| N_{ext} | Nombre de photons sortant de la LED à une longueur d'onde donnée |
| NIST | National institute of standard of technology |
| η_{conv} | Rendement de conversion |
| η_L | Rendement lumineux |
| η_q | Rendement quantique |
| η_R | Rendement de conversion de puissance rayonnée en puissance lumineuse |
| ν | Fréquence du rayonnement |
| P_E | Puissance électrique |
| P_{lum} | Puissance lumineuse |
| PLE | Couche plexiforme externe |
| PLI | Couche plexiforme interne |
| PV | photovoltaïque |
| q | Charge élémentaire |
| r | Rayon de la surface réceptrice du détecteur |
| RVB | Primaires R, V et B du système RGB CIE 1931 |
| SHP | Super-high Power |

XXIV

| | |
|-----------------------|--|
| R_a | Indice de rendu de couleur global |
| R_i | Indice de rendu de couleur spécial |
| R.L. GmbH | Roithner Lasertechnik GmbH |
| SPD | Spectral of power density |
| S_{NE} | Non-uniformité spectrale de l'irradiance |
| $\psi(\lambda)_{lum}$ | Flux lumineux |
| TC | Technical comity |
| TCS | Test colour samples |
| T | Température |
| TCP | Température de couleur proximale (ou Température de couleur corrélée) |
| T_{IE} | Instabilité temporelle de l'irradiance |
| UHP | Ultra High Power |
| UV | Spectre ultraviolet |
| $V(\lambda)$ | Fonction d'efficacité lumineuse spectrale relative normalisée de l'œil humain en mode photopique |
| $V'(\lambda)$ | Fonction d'efficacité lumineuse spectrale relative normalisée de l'œil humain en mode scotopique |
| X | Valeur de stimulus associée au premier primaire |
| x_D | Abscisse d'un illuminant de la série D dans le système CIE (x, y) 1931 |
| Y | Valeur de stimulus associée au second primaire (luminance) |
| y_D | Ordonnée d'un illuminant de la série D dans le système CIE (x, y) 1931 x_D |
| YAG-Ce | Yttrium Aluminum Garnet doped with Cerium |
| Z | Valeur de stimulus associée au troisième primaire |

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

| | |
|--------------------|--------------------------------------|
| C | Coulomb |
| cm | Centimètre |
| °C | Degré Celsius |
| Cd | Candéla |
| Cd.A ⁻¹ | Candéla par ampère |
| Cd.m ⁻² | Candéla par mètre carré |
| Hz | Hertz |
| Ω | Ohm |
| KΩ | Kilo ohm |
| °K | Degré Kelvin |
| mA | Milliampère |
| ms | Milliseconde |
| m.s ⁻¹ | Mètre par seconde |
| mW | Milliwatt |
| μm | Micromètre |
| nm | Nanomètre |
| \$ | Dollar |
| g | Gramme |
| J.s | Joule seconde |
| lm | Lumen |
| Klm | Kilo lumen |
| lm/W | Lumen par watt |
| Sun | Équivalent de 1370 W.m ⁻² |
| V | Volt |
| W | Watt |

INTRODUCTION

1. Historique

Les technologies de l'éclairage sont principalement nées du besoin de suppléer à la lumière solaire. De la préhistoire à nos jours, quatre types de technologies ont été successivement développées: tout d'abord bien sûr les lampes à combustion (huile, gaz) puis, à partir de 1880, les lampes à incandescence (filament chaud de tungstène sous gaz inerte ou halogène). Ensuite, depuis les années cinquante, les lampes à décharge (tubes fluorescents à mercure, lampes à vapeur de sodium) et finalement depuis 1968 (Mottier, 2009), les diodes électroluminescentes (DELs) avec la commercialisation de la première DEL qui produisit une radiation rouge d'à peine 0.001 lumens. Plusieurs critères permettent de classer ces différentes sources lumineuses: le coût (achat, fonctionnement, durée de vie), les caractéristiques de la lumière émise (température de couleur, le rendu de couleur), l'impact environnemental (rendement énergétique de conversion lumière/électricité, fabrication et recyclage) et les applications qui deviennent de plus en plus nombreuses. Devant toute cette diversité, la perception que l'homme peut avoir de la lumière peut varier selon les conditions d'utilisation, environnementales, etc., encore mieux, une perception obtenue dans des conditions fixées pour une application donnée peut différer d'un individu à l'autre. Dès lors, le choix des critères de performance des sources doit être étudié et spécifié selon l'application visée afin de garantir l'uniformité et la reproductibilité des mesures et des systèmes associés. C'est dans ce cadre que la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) ainsi que d'autres organismes de normalisation tels que l'American Society for Testing and Materials (ASTM), l'International Electrotechnical Commission (IEC) et le Japanese Industrial Standard (JIS) ont établi des normes visant à caractériser et à évaluer la performance des sources lumineuses ou des objets qu'elles illuminent selon le type d'application et à normaliser l'utilisation de ces dernières pour garantir la fiabilité et la sécurité. Ces différents standards sont présentés sous forme de recommandations ou modélisés sous forme de fonctions mathématiques ou encore de tables de données numériques. Ces normalisations constituent les références universelles de toute mesure colorimétrique, de caractérisation et d'évaluation des performances des sources lumineuses, des objets qu'elles illuminent et de bon nombre d'applications spécifiques émergentes. Parmi

ces différents standards, les illuminants de la CIE occupent une importance particulière. Un illuminant standard est une source théorique, parfois non réalisable physiquement, établie sous forme de tables de données par un organisme de normalisation et considéré comme le modèle optimal d'un type de sources, d'une phase ou de la moyenne des phases d'une source. La CIE a défini plusieurs illuminants pour:

- assurer la reproductibilité des mesures colorimétriques et la caractérisation de systèmes avec exactitude,
- rationaliser et ordonner l'utilisation des ressources énergétiques issues des sources lumineuses à cause du développement et de la diversité des technologies lumineuses et de leurs applications.

Les sources destinées à représenter les phases de la lumière du jour sont appelées des simulateurs solaires. La CIE a recommandé plusieurs simulateurs solaires selon le type d'application. Parmi ces derniers, nous avons porté notre intérêt sur l'illuminant standard (ou simulateur solaire normalisé) D_{65} . L'illuminant normalisé D_{65} de la CIE est considéré comme étant la meilleure représentation du profil spectral de la moyenne des phases de la lumière du jour à ciel couvert dans l'hémisphère nord. Notre choix porté sur cet illuminant se justifie par le fait que, en plus qu'il soit la référence universelle des principales applications colorimétriques, il présente un intérêt particulier dans la caractérisation et l'évaluation des performances des cellules solaires photovoltaïques.

2. Problématique

Une des problématiques majeures liée à l'utilisation des simulateurs solaires dans la caractérisation de systèmes photovoltaïques est principalement économique. La technologie actuelle prévoit des rendements théoriques de conversion de plus 86,8% mais dans la pratique, sous l'illumination d'un Sun (soit $\approx 1370 \text{ W.m}^{-2}$), les rendements sont d'environ 29% en laboratoire (Homsberg and Bowden, 2013). Des simulateurs solaires performants à lampes à arc de xénon sont déjà disponibles sur le marché mais à des coûts exorbitants (50.000 \$ l'unité) et sont assez lourds. Aussi, le spectre du xénon est caractérisé par de nombreux pics atomiques transitoires persistants et indésirables, ce qui rend son utilisation peu convenable pour certaines applications très sensibles aux fluctuations spectrales. Des

filtres sont utilisés dans certains simulateurs solaires pour modifier le spectre de leurs sources afin qu'il représente le mieux possible des conditions d'illumination solaire spécifiques; cependant, ces filtres ne sont pas en mesure d'éliminer les intensités des pics multiples du spectre de la lampe de xénon encore moins de simuler les absorptions atmosphériques dues à l'eau, au dioxyde de carbone, à l'ozone et au gaz carbonique (Hamadani and al., 2011). Des simulateurs solaires à base de lampes à mercure s'offrent à des coûts moindres avec des dimensions raisonnables mais présentent des stabilités limitées. La stabilité d'une source est un élément essentiel pour sa caractérisation d'une part ainsi que pour son utilisation dans des applications spécifiques tels que le test d'un système photovoltaïque d'autres parts. Ces dernières années, des études ont porté sur la faisabilité, le design et la fabrication de simulateurs solaires à base de DELs fonctionnant aussi bien en mode statique qu'en mode pulsé. Quelques-unes de ces études ont montré qu'avec un nombre limité de DELs à forte puissance choisi, principalement ayant des longueurs d'onde pic qui s'étendent du domaine du visible au proche infrarouge, il est possible de réaliser un simulateur solaire du mode AM 1.5G de classe B en uniformité spatiale de l'irradiance spectrale avec une intensité d'illumination d'un Sun ($\approx 1370 \text{ W.m}^{-2}$) sur une surface test de $10 \times 10 \text{ cm}^2$. Plus récemment, un groupe du National Institut of Standards and Technology a démontré la possibilité de réaliser un simulateur solaire du mode AM 1.5G de classe B en uniformité spatiale de l'irradiance spectrale à l'aide d'un réseau de plusieurs DELs sur une surface test de $25 \times 50 \text{ cm}^2$ (Hamadani and al., 2011). Une technologie plus simple permettrait de réaliser des simulateurs solaires à base de DELs plus performants du point de vue uniformité spatiale de l'irradiance spectrale sur des surfaces test comparables et de faciliter l'intégration à grande échelle de ce type de simulateurs solaires dans le marché. Aussi, bien que la technologie photovoltaïque connaisse des développements et une expansion assez prometteurs, les coûts de la mise en œuvre des systèmes restent élevés avec des rendements plus ou moins faibles. Or, la croissance et la rentabilité de cette technologie doivent nécessairement être soutenues par la baisse des coûts technologiques. Dès lors, une miniaturisation du simulateur solaire D_{65} par des moyens abordables pourrait en être un pas important. C'est dans ce cadre que nous avons porté notre intérêt sur la réalisation expérimentale d'un simulateur solaire D_{65} à base de DELs pour la caractérisation de systèmes photovoltaïques.

3. Objectifs

Dans ce travail, on se propose de réaliser expérimentalement un simulateur solaire ayant des caractéristiques photométriques aussi proches que possible celles de l'illuminant standard D_{65} , avec un profil spectral extrapolé aussi loin que possible vers la longueur $\lambda_{\max} = 1100 \text{ nm}$ tel que spécifié pour la simulation de cellules solaires photovoltaïques, par une association de spectres lumineux d'un nombre limité de diodes électroluminescentes. Aucune source représentant l'illuminant normalisé D_{65} n'est pour le moment standardisée par la CIE mais cette dernière a autorisé l'utilisation de sources respectant certaines conditions d'utilisations pour des applications particulières. L'objectif premier de ce travail est de contribuer à la réduction des coûts de mise en œuvre des systèmes photovoltaïques; ce qui est un paramètre essentiel pour leur rentabilité et pour leur intégration, particulièrement dans les pays à faibles revenus avec fort potentiel solaire.

4. Plan de travail

Ce mémoire est structuré en six chapitres.

Au CHAPITRE 1, une présentation du système visuel humain ainsi que celle des principales caractéristiques photométriques des sources lumineuses ont été faites. Le CHAPITRE 2 détaille quelques caractéristiques, systèmes et standards de la CIE relatifs à la colorimétrie. Le CHAPITRE 3 donne en détails les caractéristiques colorimétriques et spectrales des illuminants et des sources de la CIE. Une comparaison succincte entre les concepts d'illuminants et de sources y est abordée en fin de chapitre. Au CHAPITRE 4, sont présentées les différentes caractéristiques ainsi que les différentes techniques de caractérisation des simulateurs solaires. Le CHAPITRE 5 donne en première partie un rappel sur les propriétés photométriques des DELs. Une présentation du matériel expérimental et de la méthodologie utilisés pour la réalisation et la caractérisation expérimentales du simulateur solaire D_{65} est détaillée dans la deuxième partie du chapitre. Au CHAPITRE 6 sont détaillées les étapes de réalisation du simulateur solaire D_{65} suivies d'une discussion des résultats

obtenus afin d'évaluer la pertinence du travail effectué. Enfin, une conclusion générale résume les principaux résultats.

CHAPITRE 1

SYSTÈME VISUEL HUMAIN ET LES GRANDEURS PHOTOMETRIQUES

1.1 Le système visuel humain

Depuis la fin du XIX^{ème} siècle, l'étude de la vision ne se limite plus à l'étude optique de l'œil mais davantage à l'étude physiologique du système visuel dans son ensemble. La comparaison de l'œil à un dispositif photographique paraît difficile, voire incongrue, car l'étude de l'œil ne permet pas d'expliquer à lui seul notre perception visuelle. L'image formée sur la rétine est différente de celle que l'on obtient avec un appareil photographique. Cependant, une compréhension approfondie de la science des couleurs repose essentiellement sur le principe de fonctionnement du système visuel humain et de son traitement des scènes. L'intérêt de ce chapitre est de montrer la relation qui lie la puissance du rayonnement électromagnétique reçu par l'œil humain et le flux lumineux perçu. Ce dernier joue un rôle primordial dans l'étude de la performance des sources lumineuses.

1.1.1 L'œil humain et la vision

1.1.1.1 Anatomie de l'œil

L'œil adulte est un globe quasi sphérique d'un diamètre sagittal de 24 mm et avec un poids d'environ 7g (Guillo, 2004). Il est entouré d'une enveloppe fibreuse, appelée la sclérotique, limitée en avant par une partie bombée transparente: la cornée, qui constitue avec l'humeur aqueuse l'élément optique principal. L'œil, dont le pivotement est assuré par trois paires de muscles est relié au cerveau par le nerf optique. La figure 1.1 donne une coupe horizontale de l'œil humain montrant les différentes parties fonctionnelles du système visuel.

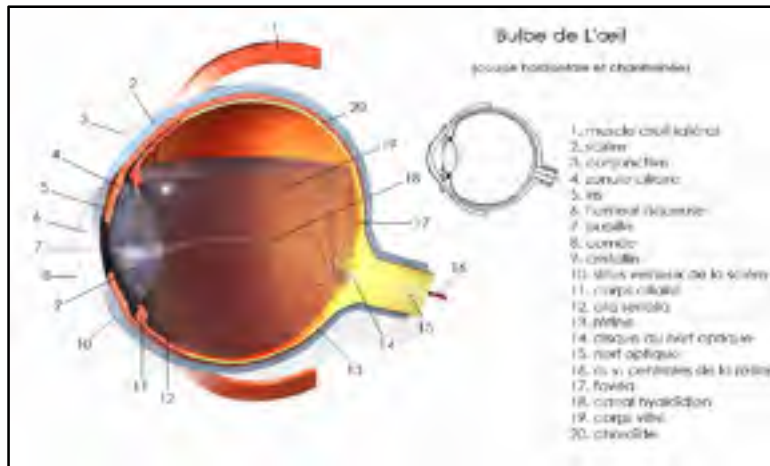


Figure 1.1 Coupe horizontale de l'œil
Tirée de Guillo (2004)

La partie intérieure de la sclérotique est tapissée d'une tunique vasculaire pigmentée qui absorbe la lumière et qui s'étend de l'arrière de l'œil jusqu'à l'iris. Nommée choroïde, elle est recouverte par la rétine qui constitue la partie photosensible de l'œil, et dont le prolongement des cellules nerveuses est relié au nerf optique. La cavité intérieure de l'œil contient deux liquides biologiques: le corps vitré, une gelée transparente, et l'humeur aqueuse qui sont séparés par une lentille biologique, le cristallin. Notre étude sur le traitement de l'information visuelle commencera par la rétine, tous les éléments antérieurs ne seront pas considérés dans la suite.

1.1.1.2 La rétine

La rétine est l'une des plus importantes parties de l'anatomie de l'œil dans la vision des objets colorés. Cette membrane mince, d'environ $250\ \mu\text{m}$ d'épaisseur a une grande sensibilité à la lumière et participe au traitement des informations, avant de les transmettre au cerveau via le nerf optique. La rétine est constituée d'un assemblage de cellules de différents types, organisées en couches et ayant des propriétés particulières. La figure 1.2 montre l'organisation de ces couches cellulaires. On y trouve une première couche constituée de photorécepteurs avec une répartition très inégale, à la fois spatiale et numérique, soit d'environ 100 à 120 millions de bâtonnets et 5 à 8 millions de cônes (Guillo, 2004; Wei, 2011) qui captent l'information lumineuse, une deuxième couche de cellules horizontales, de

cellules bipolaires et de cellules amacrines et enfin une troisième couche constituée des cellules ganglionnaires. Ces couches sont séparées par des zones de connexions synaptiques: la couche plexiforme externe (PLE) et la couche plexiforme interne (PLI). Un aperçu de l'échantillonnage des photorécepteurs sur la rétine est représenté à la figure 1.3 (a) et la variation de la concentration des photorécepteurs sur la figure 1.3 (b). La zone centrale (faible excentricité) ne contient que des cônes, elle constitue la fovéa. La densité des cônes y est d'environ 147.000 par millimètre carré, mais elle décroît rapidement vers l'extérieur, correspondant à un champ visuel de 10 degrés, à 5.000 par millimètre carré (Guillo, 2004). En raison du très faible pas d'échantillonnage des photorécepteurs, on y note une vision de jour de haute précision et une vision de très faible sensibilité dans l'obscurité du fait de l'absence de bâtonnets.

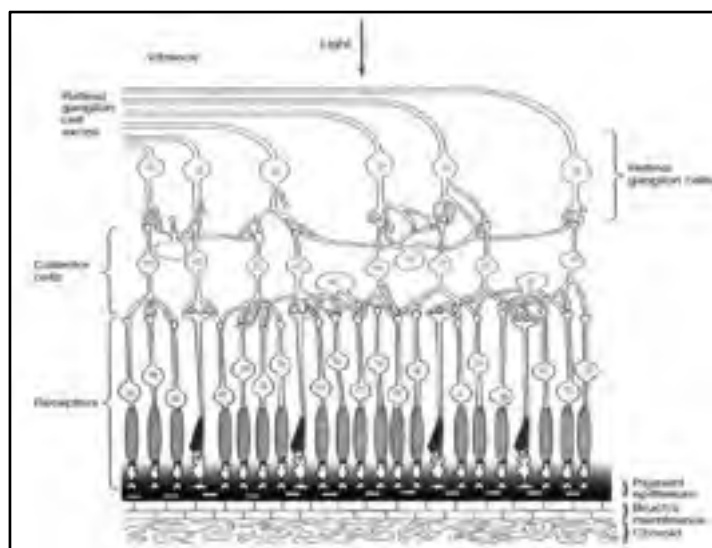


Figure 1.2 Diagramme simplifié de
l'organisation de la rétine
Tirée de Wei (2011)

La zone d'excentricité moyenne (parafovéa) comporte une faible proportion de cônes et une population de bâtonnets croissante. Dans cette zone la vision de jour est moins précise, mais la vision en obscurité est performante. Enfin, pour les fortes excentricités, les cônes sont presque absents et laissent la place aux bâtonnets. On remarque aussi le disque optique. C'est une zone de la rétine dépourvue de capteur, car c'est à cet endroit que les axones des

neurones qui constituent le nerf optique se rejoignent pour partir en direction du cerveau. Cette zone est aussi appelée "*tâche aveugle*".

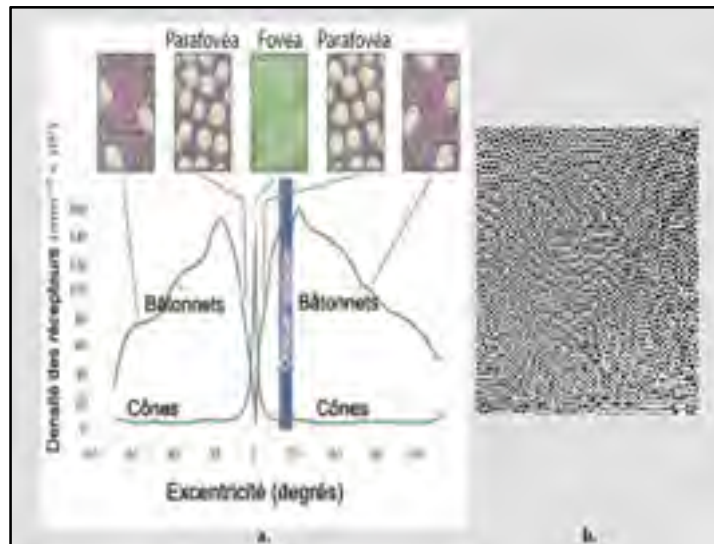


Figure 1.3 **a.** Distribution des cônes et des bâtonnets dans la rétine **b.** Aperçu de l'échantillonnage des photorécepteurs sur la rétine
Tirée de Benoit (2007)

1.1.1.3 Les éléments photosensibles

Au niveau de la rétine, il existe des cellules photosensibles appelées neurones électriquement excitables qui sont en mesure de traiter et de véhiculer l'information sous forme de signaux électriques et/ou chimiques au sein de notre corps. Ces cellules photosensibles sont appelés photorécepteurs. Un photorécepteur est un neurone particulier sis sur la rétine qui a la capacité de convertir le stimulus lumineux en un potentiel de membrane pouvant provoquer le déclenchement d'un processus biologique. Les photorécepteurs de l'œil sont essentiellement constitués des bâtonnets et des cônes. Un troisième photorécepteur découvert en 2002 (Wei, 2011), et appelée cellule ganglionnaire rétinienne intrinsèquement photosensible (**ipRGC** pour "*Intrinsically Photosensitive Retinal Ganglion Cells*" en anglais), a pour rôle d'établir une relation entre la neurophysiologie et la photobiologie circadienne. Les bâtonnets et les cônes contiennent des photopigments chimiques qui réagissent sous l'action de la lumière pour déclencher des signaux électriques. Ces signaux

suivent un réseau de neurones, arrivent au fond de l'œil et longent le nerf optique qui les conduit vers le cerveau. La principale différence entre les bâtonnets et les cônes réside dans leur fonction visuelle. Les bâtonnets sont actifs sous de faibles niveaux de lumière (luminance $< 0.003 \text{ cd.m}^{-2}$) avec un maximum de sensibilité vers 510 nm et sont responsables de la vision scotopique (ou nocturne) (E. Fred Schubert, 2006). La particularité des bâtonnets est qu'ils ne fournissent qu'une réponse photométrique et ne permettent donc pas de distinguer les couleurs. Ils sont très sensibles à la lumière et ont une réponse lente aux variations d'illumination. Quant aux cônes, ils sont responsables de la vision photopique ou diurne (luminance $> 3 \text{ cd.m}^{-2}$) (E. Fred Schubert, 2006) et fournissent une réponse photométrique et chromatique grâce à leurs photopigments. Des études portées sur ces pigments visuels par micro-spectrophotométrie ont permis de vérifier les théories de Young et Helmholtz, de la perception trichrome des couleurs par les cônes de la rétine. Ces études ont montré l'existence de trois types de cônes contenant des photopigments dont les domaines d'absorption spectrale sont répartis dans le domaine du visible, avec approximativement des pics à 440, 530 et 570 nm (Benoit, 2007). On dit que la vision colorée est par nature trichromatique. La figure 1.4 donne une approximation du profile des fonctions de sensibilité spectrale des bâtonnets et des trois types de cônes.

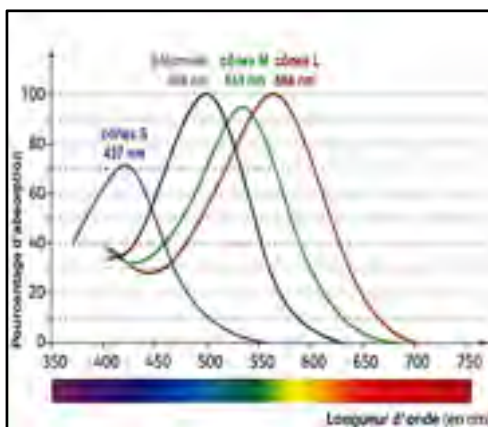


Figure 1.4 Sensibilité spectrale des différents types de récepteurs à la longueur d'onde de la lumière
Tirée de Nguyen (2012)

Lorsque la luminosité est comprise entre 0.003 cd.m^{-2} et 3 cd.m^{-2} (E. Fred Schubert, 2006) les  ttonnets et les cônes sont actifs simultanément et on parle de vision mésopique. Les trois types de cellules horizontales, bipolaires, amacrines de la deuxième couche et les cellules ganglionnaires de la troisième couche ne sont pas des photorécepteurs mais jouent un rôle important dans le processus visuel. Les cellules horizontales réagissent aux éclairements des régions rétiniennes larges et participent principalement à l'ajustement automatique de la sensibilité, ce qui permet en outre de percevoir d'importants écarts de luminance, en faisant varier la sensibilité des photorécepteurs. De la même manière, les cellules amacrines intègrent les informations de larges étendues rétiniennes, mais cette fois pour interagir sur l'ajustement de l'équilibre chromatique des signaux reçus des photorécepteurs, sous forme de variations échelonnées de potentiels gradués. Quant aux cellules ganglionnaires, un de leurs principaux rôles est de modifier profondément l'information en train d'impulsions électriques pour le nerf optique.

1.1.2 Sensibilité spectrale de l'œil humain

Le spectre électromagnétique est constitué de l'ensemble des radiations possibles du rayonnement électromagnétique allant des longueurs d'ondes courtes aux longueurs d'ondes longues. Tout ce domaine spectral n'est pas visible par l'œil humain. La lumière visible n'est qu'une petite partie comprise entre 380 nm et 780 nm de ce spectre. De plus, le comportement de l'œil vis-à-vis d'un rayon lumineux dépend de la longueur d'onde, du cône d'acceptance et de l'observateur avec les qualités et les défauts propres à chaque individu. A énergie égale, les rayonnements des extrémités du spectre visible sont moins facilement perceptibles que ceux de la partie centrale. Cependant, l'œil humain est capable de discerner plus de 350.000 couleurs différentes (Gillet, 2008). Dès lors, pour éviter d'éventuelles disparités sur la façon de concevoir la lumière perçue, la (CIE) a standardisé en 1924 une fonction d'efficacité lumineuse relative spectrale de l'œil-type (ou fonction de sensibilité relative ou de correction de l'œil) notée $V(\lambda)$ entre 360 nm et 830 nm. Cette fonction est obtenue en moyenne des données expérimentales d'observations colorimétriques effectuées par différents individus qui représente la sensibilité de l'œil humain moyen (ou "* il-type*") en fonction de la longueur d'onde. L' "* il-type*" correspond à l'œil d'un sujet moyen  g  de 32

ans recevant des niveaux de lumière usuels sous un angle d'observation de 2° (CVRL, 2013). Dès lors, pour évaluer le comportement de l'œil vis-à-vis d'un rayonnement donné, il convient de pondérer le flux de ce dernier et toutes ses grandeurs énergétiques par l'efficacité lumineuse du rayonnement $V(\lambda)$ à chaque longueur d'onde du spectre visible. La fonction $V(\lambda)$ est une fonction de normalisation, centrée à 555 nm , qui exprime la relation entre le flux lumineux perçu par l'œil humain et la puissance du rayonnement électromagnétique reçu. Le tableau 1.1 donne quelques valeurs de la fonction $V(\lambda)$ à certaines longueurs d'ondes.

Tableau 1.1 Quelques valeurs de la fonction de l'efficacité spectrale relative $V(\lambda)$ à certaines valeurs de longueur d'onde
Tiré de C. Baillet (2005)

| | | | | | | | |
|------------------------|-------------------|---------------------|-------|------------|-------|-------|---------------------|
| $\lambda \text{ (nm)}$ | 400 | 450 | 500 | 555 | 600 | 650 | 700 |
| $V(\lambda)$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | $3,8 \cdot 10^{-2}$ | 0.323 | 1 | 0,631 | 0,107 | $4,1 \cdot 10^{-2}$ |

En 1951, la CIE a adjoint une autre fonction d'efficacité lumineuse renforçant la sensibilité de l'œil-type aux faibles niveaux de lumière. Cette fonction centrée à 507 nm correspond à la vision scotopique. La figure 1.5 donne les profils des fonctions d'efficacité lumineuse spectrale relatives normalisées de l'œil en mode photopique $V(\lambda)$ et en mode scotopique $V'(\lambda)$ tel que spécifiées par la CIE.

1.2 Les grandeurs photométriques

En radiométrie, le flux énergétique, en Watt, émis, transporté ou reçu, caractérise physiquement le rayonnement lumineux et est défini comme étant la puissance totale de la radiation électromagnétique émise par un composant. Cependant, cette puissance n'apporte aucune indication sur la façon dont celle-ci est perçue par l'œil. Pour le cas d'une radiation monochromatique, son énergie est liée à sa longueur d'onde λ (ou sa fréquence ν) par la relation ci-dessous:

$$E(\lambda) = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (1.1)$$

Avec

$h = 6.626 * 10^{-34} J.s$: constante de Planck

$c = 299.792.458 m.s^{-1}$: vitesse de la lumière dans le vide

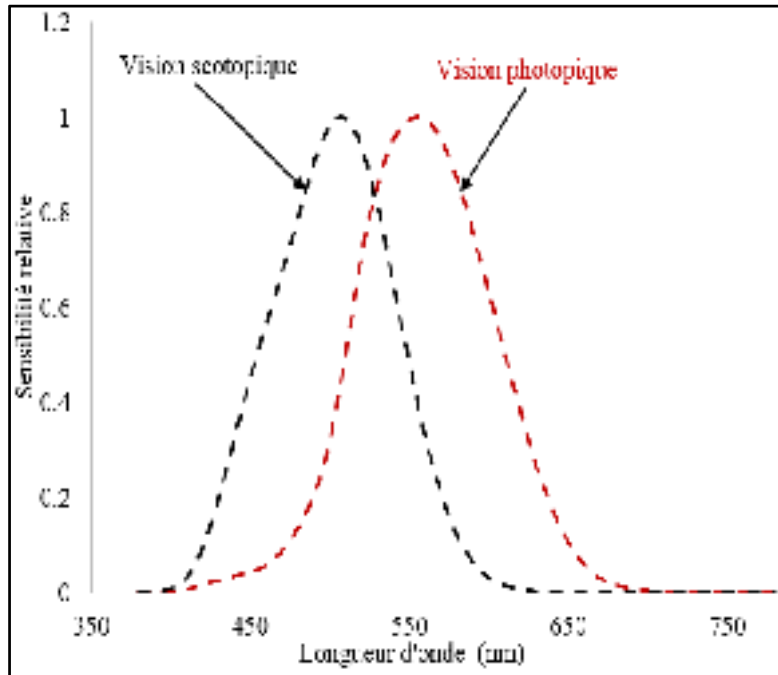


Figure 1.5 Fonctions d'efficacité lumineuse relative spectrale photopique $V(\lambda)$ et scotopique $V'(\lambda)$ normalisées tel que spécifiées par la CIE 1931

La puissance totale rayonnée à une longueur d'onde donnée $\phi(\lambda)$, parfois appelée densité spectrale de puissance du rayonnement est calculée à partir du flux de photons émis à la longueur d'onde considérée, tel qu'illustré par l'équation 1.2.

$$\phi(\lambda) = N(\lambda) * E(\lambda) \quad (1.2)$$

Avec

$N(\lambda)$: flux de photons émis à la longueur d'onde λ ;

$E(\lambda)$: énergie d'un photon à la longueur d'onde λ .

La dépendance de la sensibilité de l'œil à la longueur d'onde, avec des maximums au voisinage de 555 nm en vision photopique et 507 nm en vision scotopique, justifie l'intérêt des grandeurs photométriques pour une caractérisation plus poussée du rayonnement visible.

1.2.1 Flux lumineux

La puissance totale rayonnée par un composant ne représente pas directement le flux lumineux (quantité photométrique en **lumen (lm)**) perçu par le système visuel humain. Le flux lumineux, parfois appelé puissance lumineuse, est défini de la manière suivante: *"Une source monochromatique émettant une puissance optique de $\frac{1}{683}$ watt à la longueur d'onde $\lambda = 555 \text{ nm}$ à un flux lumineux de 1 lumen"* (E. Fred Schubert, 2006). Il exprime l'énergie totale rayonnée par une source lumineuse et sa valeur est obtenue par l'équation 1.3:

$$\psi(\lambda)_{\text{lum}} = k \int \phi(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1.3)$$

Avec

$\psi(\lambda)_{\text{lum}}$: flux lumineux sur le domaine de fréquences considéré;

$\phi(\lambda)$: densité spectrale de puissance;

$V(\lambda)$: fonction d'efficacité lumineuse relative spectrale de l'œil;

$k = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$: constante de conversion entre la puissance rayonnée et le flux lumineux.

1.2.2 Intensité lumineuse

L'intensité lumineuse, exprimée en candela, est la quatrième grandeur fondamentale de l'optique. Elle est définie comme une mesure de puissance de la lumière perçue par l'œil humain suivant une direction donnée. En d'autres termes *"Une source monochromatique émettant une puissance optique de $\frac{1}{683}$ watt à la longueur d'onde $\lambda = 555 \text{ nm}$ dans un angle solide de 1 stéradian (sr) à une intensité lumineuse de 1 Candela (Cd)"* (E. Fred Schubert, 2006). La Candela est l'intensité lumineuse d'une source qui émet, dans une direction donnée, un rayonnement monochromatique de fréquence $\nu = 540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$ et dont l'intensité énergétique dans cette direction est $1/683 \text{ Watt par stéradian}$. (C. Baillet, 2005).

1.2.3 Luminance

La luminance (ou brillance) d'un point d'une source étendue dans une direction donnée mesure le flux lumineux émis par ce point, ramené à l'angle solide unité et à l'aire apparente unité centrée sur cette direction. Elle s'exprime en candela par mètre carré (Cd.m^{-2}) et dans le cas d'un spectre continu, est donnée par l'équation 1.4.

$$L(\lambda) = k \int_{380}^{830} L_e(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1.4)$$

Avec

$L(\lambda)$: luminance en watt.m^{-2} ;

$k = 683 \text{ lm.W}^{-1}$: maximum d'efficacité lumineuse relative spectrale pour une vision photopique;

$L_e(\lambda)$: luminance énergétique spectrale en $\text{watt.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\text{nm}^{-1}$;

$V(\lambda)$: fonction d'efficacité lumineuse relative spectrale de l'œil.

1.2.4 Efficacité lumineuse du rayonnement

Au sein d'une source lumineuse, on retrouve deux principaux niveaux de conversion de l'énergie. Le premier est la conversion de l'énergie électrique en énergie rayonnée et le second la conversion de l'énergie rayonnée en flux lumineux tel qu'illustré à la figure 1.6.

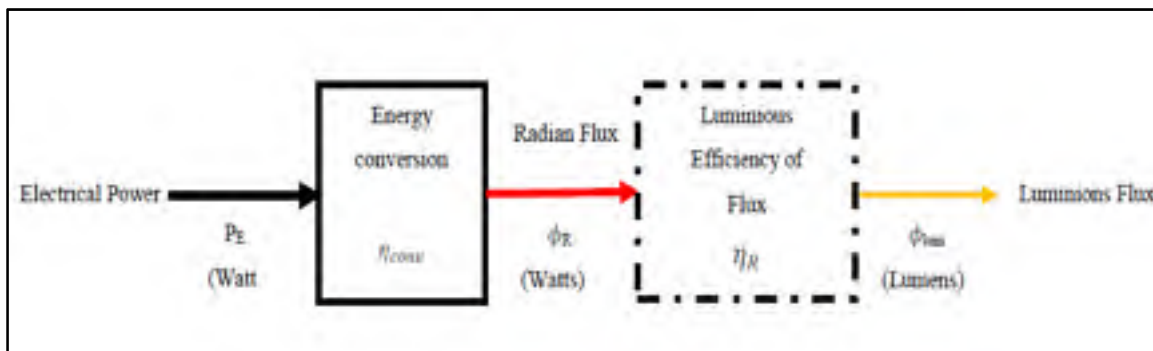


Figure 1.6 Différents niveaux de conversion de l'énergie au sein d'une DEL
Tirée d'A. Chalmers et al. (2010)

L'efficacité lumineuse de radiation (ou LER, abréviation du terme anglais "*Luminous efficiency of radiation*") décrit le niveau de perception par l'œil de la brillance d'un rayon lumineux. Elle représente la principale figure de performance d'une source et est donnée par l'expression 1.5.

$$\text{LER}(lm.W^{-1}) = \frac{\Phi_{lm}}{P_E} = \frac{k \int \phi(\lambda).V(\lambda).d\lambda}{\int \phi(\lambda).d\lambda} = \eta_R * \eta_{conv} \quad (1.5)$$

Avec

Φ_{lm} : flux lumineux;

P_E : puissance électrique;

η_{conv} : rendement de conversion d'énergie électrique en énergie rayonnée;

η_R : rendement conversion énergie rayonnée en flux lumineux.

Puisque le pic de sensibilité de l'œil se situe à la longueur d'onde $\lambda = 555 \text{ nm}$, la valeur maximale du LER égale à 683 lm.W^{-1} est obtenue à partir d'une radiation verte monochromatique de longueur d'onde $\lambda = 555 \text{ nm}$. En d'autres termes, 683 lm.W^{-1} est la plus grande valeur possible de LER que peut avoir une source lumineuse c'est-à-dire, lorsque 100% de la puissance électrique injectée est convertie en lumière à la longueur d'onde $\lambda = 555 \text{ nm}$. Pour obtenir la lumière blanche il est nécessaire d'émettre à la fois dans le rouge, dans le vert et dans le bleu; la LER des sources blanches est donc significativement inférieure à 683 lm.W^{-1} étant de l'ordre de 350 lm.W^{-1} en laboratoire (Mottier, 2009).

1.2.5 Distribution spectrale relative de puissance (SPD) ou d'énergie

La lumière émise par la majorité des sources n'est pas monochromatique. La distribution spectrale relative d'énergie (ou SPD pour "*Spectral Power Distribution*" en anglais) donne la répartition d'énergie rayonnée sur un certain domaine spectral du visible. Dans le cas des DELs, elle dépend du type, des propriétés et de la structure de la jonction P-N comme la largeur de la couche épitaxiale, du type de dopant du composant semi-conducteur, etc., ...

1.2.6 Rendements quantiques

Le rendement quantique d'une source traduit l'efficacité de la recombinaison des électrons et des trous pour générer des photons. Dans la littérature, les rendements quantiques s'expriment souvent en Candela par Ampère (Cd.A^{-1}).

1.2.6.1 Rendement quantique externe

Le rendement quantique externe η_q représente le rapport du nombre de photons utiles émis par une source lumineuse, dans une direction donnée, vers l'extérieur du dispositif par le nombre de charges injectées selon l'équation 1.6.

$$\eta_q = \frac{q \int N_{\text{ext}}(\lambda) \cdot d\lambda}{I_s} \quad (1.6)$$

Avec

$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$: charge élémentaire;

$N_{\text{ext}}(\lambda)$: nombre de photons sortant de la source lumineuse à une longueur d'onde donnée;

I_s : courant traversant la source.

Il n'est pas exclu qu'une partie des photons générés ne sortent pas du dispositif et soient par exemple perdus par réabsorption ou évacués par réflexion parasite le long des couches minces du substrat formant les guides d'ondes. Dans ce cas, on parle alors de rendement quantique interne.

1.2.6.2 Rendement quantique interne

C'est le rapport du nombre de photons générés par recombinaison sur le nombre de charges injectées. Il est délicat de faire son estimation car il dépend de la structure macroscopique de la source (type de substrat, dimensions, indice de réfraction, etc.), de l'absorbance des matériaux utilisés.

CHAPITRE 2

COLORIMETRIE

2.1 Introduction

La colorimétrie est la science de la mesure et de la reproduction de la couleur. Elle permet de qualifier d'une manière scientifique et rigoureuse la perception de la couleur qui n'est pas une quantité physique mesurable. Cependant, cette sensation colorée, intuitivement comportant trois caractéristiques que sont la luminosité, la teinte et la saturation, ne peut être exprimée mathématiquement que par trois valeurs puisque l'œil ne comporte que trois types de photorécepteurs. L'objectif n'est donc pas de s'attacher à reproduire un spectre lumineux identique en tout point à celui d'origine mais d'établir le comportement additif et linéaire de la sensation de la couleur indépendamment du spectre de la couleur.

2.2 Lois de Grassmann

Les lois de Grassmann sont à la base de colorimétrie trichromatique. Elles sont établies à partir des cinq hypothèses et ont permis d'établir le comportement additif et linéaire de la sensation de la couleur, indépendamment du spectre de la couleur.

Si A, B et C sont trois stimuli de couleurs, les hypothèses (Chherawala, 2007) sont les suivantes¹:

1. Réflexivité: $A \equiv A$;
2. Symétrie: Si $A \equiv B$ alors $B \equiv A$;
3. Transitivité: $A \equiv B$ et $B \equiv C$ alors $A \equiv C$;
4. Additivité: $A \equiv B$ alors $A + C \equiv B + C$;
5. Dilatation: $A \equiv B$ alors $k.A \equiv k.B$ avec $k > 0$.

¹ $A \equiv B$ signifie que A est indifférentiable de B

Ces hypothèses ont permis à Grassmann d'établir trois lois de manière expérimentale:

- pour égaliser visuellement une couleur, un ensemble de trois sources lumineuses de longueurs d'onde distinctes sont nécessaires et suffisantes;
- il remarque que dans un mélange additif de lumières colorées, seules les couleurs perçues sont importantes, et non leurs répartitions spectrales;
- si dans un mélange additif de lumières colorées, une ou plusieurs lumières sont graduellement modifiées, la couleur résultante sera, elle aussi, graduellement modifiée.

2.3 Expérience d'égalisation des couleurs

Sur la base des lois de Grassmann associées à la théorie de la trivariance visuelle, l'objectif fixé était d'associer à chaque stimulus visuel élémentaire, une mesure de ce stimulus de couleur à partir d'expériences dites d'égalisation de couleurs. Ces expériences consistent à faire comparer par un observateur dit de référence un stimulus test à un stimulus de référence en les projetant dans un champ visuel uniforme, entouré d'un fond uniforme. La figure 2.1 donne le modèle d'expérience classique pour la reproduction d'un stimulus test. Le stimulus test est projeté sur un côté du plan médian du champ visuel et le mélange additif des trois stimuli de base est projeté sur l'autre côté du plan. En utilisant des atténuateurs de couleurs réglables, on peut ajuster le flux lumineux de chacun des trois stimuli de base pour obtenir des couleurs identiques des deux côtés du plan médian du champ visuel de l'observateur. Les expériences d'égalisation de couleurs ont permis de reproduire l'ensemble des stimuli de couleurs du spectre visible (380 nm à 780 nm) par une synthèse additive de trois primaires. Ces primaires satisfont donc aux lois de Grassmann (Chherawala, 2007) et ces expériences ont permis d'établir le système RVB CIE 1931.

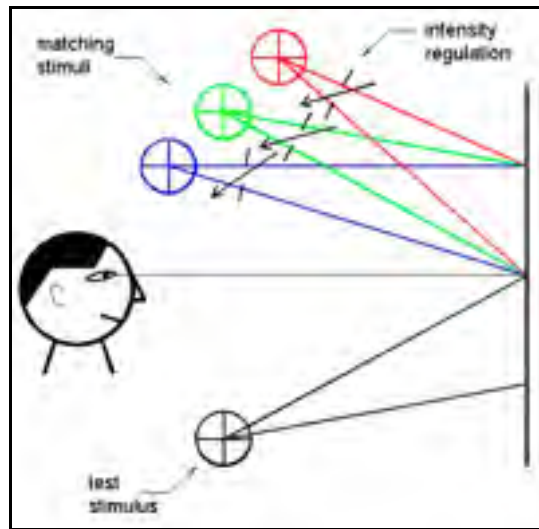


Figure 2.1 Expérience classique pour la reproduction d'une couleur blanche
Tirée de CIE (1999)

2.4 Coordonnées et diagrammes de chromaticité

Les systèmes les plus couramment utilisés pour décrire la couleur des sources et des objets sont ceux de la CIE. La couleur y est représentée par trois valeurs de stimulus ou par deux coordonnées de chromaticité et une de luminosité (Schanda, 2007). Ces coordonnées de chromaticité sont regroupées dans un diagramme de chromaticité qui englobe l'ensemble des couleurs du spectre visible.

2.4.1 Valeurs tri-stimulus R, V, B

La description d'un stimulus de couleur par les valeurs de luminosité des trois stimuli de base reçues par l'œil d'un observateur de référence est mathématiquement décrite par l'équation 2.1.

$$[C] = R[R] + V[V] + B[B] \quad (2.1)$$

Avec

[C]: couleur du stimulus inconnu;

[R], [V], [B]: unités respectives des stimuli de base Rouge, Vert et Bleu;

R, V, B: contribution respective des stimuli Rouge, Vert et Bleu pour voir identique à C.

Les grandeurs R, V, B représentent respectivement les trois primaires (stimuli) de couleurs pures Rouge, Vert et Bleu qui ont permis de reproduire le stimulus C . La distribution spectrale de puissance du stimulus test est généralement différente de celle du mélange des trois stimuli de base; on parle de couleurs métamériques. Deux couleurs métamériques sont deux couleurs qui apparaissent identiques pour un observateur (mêmes valeurs de tristimuli) mais présentant des distributions spectrales de puissance relatives différentes.

2.4.2 Observateur de référence de la CIE de 1931: Fonctions d'accord de couleurs

En s'inspirant des expériences de Guild et de Wright (Chherawala, 2007), la CIE a normalisé un jeu de trois couleurs primaires, monochromatiques dont les longueurs d'ondes sont 700,0 nm pour le rouge, 546,1 nm pour le vert et 435,8 nm le bleu. L'ensemble des couleurs du spectre visible peut être construit par synthèse additive de ces trois couleurs primaires, pondérées par des coefficients. Ces coefficients, appelés fonctions colorimétriques ou composantes trichromatiques spectrales ont été déterminés lors des expériences d'égalisation de la CIE réalisées par des observateurs standard. La CIE a ainsi normalisé un système de fonctions colorimétriques dénommées $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{v}(\lambda)$ et $\bar{b}(\lambda)$ liées à chacune des primaires et qui permet d'interpréter avec précision les sensations colorées. C'est "*l'Observateur de Référence*" exposé en 1931, dit CEI 1931. Il correspond à une vision des couleurs sous un angle de 2° , une valeur considérée suffisante pour les applications vidéo (Commission Supérieure Technique de l'Image et du Son, 1998). Les quantités R, V, B sont les stimuli de base de l'espace CIE RVB 1931 et correspondent au poids de chacun des trois stimuli de base, par rapport à un système trichromatique, nécessaire pour reconstituer la couleur du stimulus considéré. La dépendance de ces quantités à la longueur d'onde pour la reproduction d'un stimulus élémentaire correspond aux fonctions d'accord de couleur et leurs valeurs correspondent à celles des stimuli de base nécessaires pour reproduire un quelconque stimulus monochromatique élémentaire du visible. La figure 2.2 donne la représentation graphique de ces fonctions colorimétriques standard dans le système CIE RVB 1931.

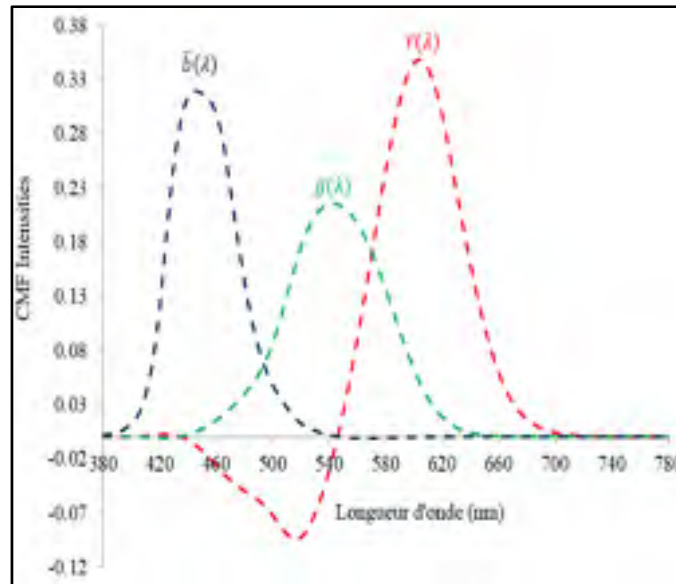


Figure 2.2 Fonctions spectrales standard $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{v}(\lambda)$ et $\bar{b}(\lambda)$ du système CIE-RVB 1931 à 2°

Pour un stimulus de couleur de distribution spectrale de puissance $S(\lambda)$, les valeurs de tristimuli R, V et B lui correspondant dans l'espace CIE RVB sont données par les d'équations 2.2 à 2.4.

$$R = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot \bar{r}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.2)$$

$$V = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot \bar{v}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.3)$$

$$B = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot \bar{b}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.4)$$

Avec

R, V, B: valeurs de tristimuli de l'espace RGB CIE;

$\bar{r}(\lambda)$, $\bar{v}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$: fonctions d'accord de couleurs;

$S(\lambda)$: distribution spectrale de puissance;

K: constante de normalisation.

Les primaires $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{v}(\lambda)$ et $\bar{b}(\lambda)$ présentent l'avantage d'être normalisées sur le domaine du visible.

$$\int_{380}^{780} \bar{r}(\lambda) \cdot d\lambda = \int_{380}^{780} \bar{v}(\lambda) \cdot d\lambda = \int_{380}^{780} \bar{b}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.5)$$

Cependant, le lobe négatif de la fonction $\bar{r}(\lambda)$ du système RVB CIE 1931 représente un inconvénient majeur car s'oppose au principe de synthèse additive. Ceci signifie qu'à quelques niveaux du spectre, la reproduction d'un stimulus test n'est possible que lorsqu'on combine un des stimuli de base au stimulus test lui-même (Dangol, 2011), ce qui n'est pas convenable en pratique car toutes les couleurs ne peuvent être reproduites. De plus, avant l'arrivée des ordinateurs, ces lobes négatifs rendaient les calculs assez compliqués. C'est pourquoi un nouveau système colorimétrique a été introduit.

Pour surmonter les limites du système RVB CIE 1931, la CIE décide en 1931 de supprimer les lobes négatifs et de transformer les primaires [R], [V] et [B] en primaires [X], [Y] et [Z], de sorte que les valeurs de tri stimuli de base d'un stimulus équiénergétique soient égales ($X = Y = Z$) et qu'une des leurs corresponde aux quantités colorimétriques ($\phi, I, L, E, etc., \dots$) (Chherawala, 2007). C'est le nouveau système de primaires XYZ CIE 1931, puis 1964, introduit par Judd et dit imaginaire car ses primaires n'ont pas de réalité physique.

Comme les primaires $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{v}(\lambda)$ et $\bar{b}(\lambda)$, chacune des fonctions $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ et $\bar{z}(\lambda)$ est normalisée sur le spectre visible.

$$\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \bar{x}(\lambda) \cdot d\lambda = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.6)$$

Les valeurs de tristimuli X, Y et Z sont données dans le système CIE-XYZ 1931 par les d'équations 2.2 à 2.4.

$$X = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.7)$$

$$Y = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.8)$$

$$Z = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.9)$$

Avec

X, Y, Z: valeurs tri stimuli du système trichromatiques CIE XYZ;

$\phi(\lambda)$: fonction densité de puissance relative de la lumière vue par un observateur (ou distribution spectrale de puissance relative du stimulus);

K: constante de normalisation.

$\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ et $\bar{z}(\lambda)$: fonctions colorimétriques standards ou fonctions d'accord de couleurs (CMFs abréviation du terme anglais "*Color Matching Functions*") de l'observateur standard CIE XYZ 1931.

Le transfert des coordonnées du système RVB au système XYZ se fait de façon linéaire au moyen d'une matrice de passage comme l'illustre l'équation 2.10.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,768892 & 1,751748 & 1,130160 \\ 1,000000 & 4,590400 & 0,060100 \\ 0,000000 & 0,056508 & 5,594292 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ V \\ B \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Avec

X, Y, Z: nouvelles valeurs de tri-stimulus;

R, V, B: valeurs de tristimuli de l'espace CIE RGB 1931;

Les colonnes $\begin{bmatrix} 2,768892 \\ 1,000000 \\ 0,000000 \end{bmatrix}$; $\begin{bmatrix} 1,751748 \\ 4,590400 \\ 0,056508 \end{bmatrix}$ et $\begin{bmatrix} 1,130160 \\ 0,060100 \\ 5,594292 \end{bmatrix}$ de la matrice (3 x 3) de l'équation (2.10) sont les coordonnées (x, y, z) des primaires rouge, vert et bleu.

Le standard trichromatique CIE 1931 est uniquement destiné à de petits stimuli (champs visuels de 1 à 4 degré (s)). Pour tenir compte de la description de grands stimuli, la CIE définira en 1964 de nouvelles CMFs pour un champ visuel de 10 degrés comme complément

du standard XYZ CIE 1931. Elles sont notées $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$ et $\bar{z}_{10}(\lambda)$ et correspondent au standard colorimétrique XYZ CIE 1964. La figure 2.3 donne les courbes des fonctions colorimétriques standards des systèmes CIE XYZ 1931 et CIE XYZ 1964.

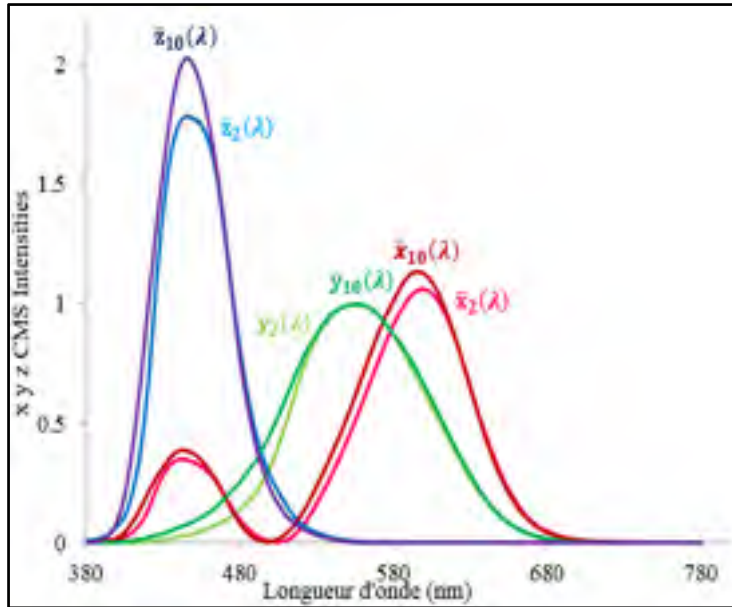


Figure 2.3 Fonctions standards d'accord de couleurs $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ et $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ des systèmes respectifs CIE XYZ 1931 et CIE XYZ 1964

2.4.3 Coordonnées chromaticité et diagramme de chromaticité CIE 1931

2.4.3.1 Coordonnées de chromaticité

Le stimulus de couleur est complètement décrit par les trois valeurs de tristimuli mais cette description est difficile à concevoir; d'où l'intérêt d'utiliser les coordonnées de chromaticité normalisées obtenues en faisant le rapport de chacune des trois valeurs de tristimuli à leur somme (Chherawala, 2007; Dangol, 2011).

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (2.11)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (2.12)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (2.13)$$

Avec

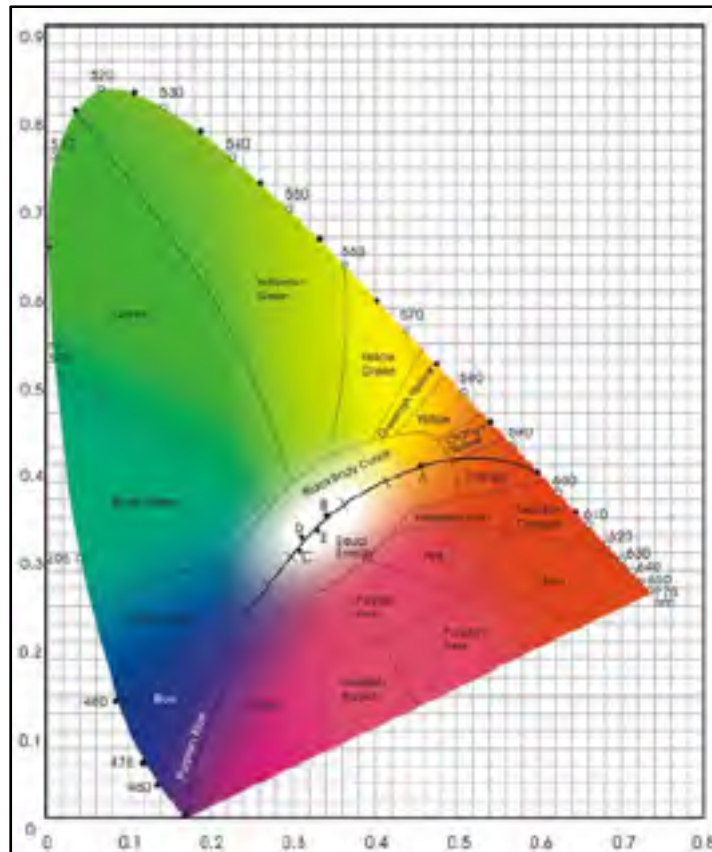
X, Y, Z : valeurs de tri-stimulus;

x, y, z : coordonnées de chromaticité ($x + y + z = 1$) dans le système CIE XYZ 1931.

La somme de ces trois coordonnées de chromaticité est égale à 1, d'où la notation xyY (Chherawala, 2007). Deux d'entre elles suffisent pour décrire des chromaticités dans un espace à deux dimensions à une luminance Y constante : les coordonnées x et y . La chromaticité est une propriété de stimulus de couleur définie par ses coordonnées de chromaticité, ou par sa longueur d'onde dominante ou complémentaire et sa pureté prise ensemble. Elle détermine la teinte et la saturation mais ne tient pas compte de la luminosité. L'équivalence qui lie la chromaticité aux coordonnées de chromaticité permet de représenter la couleur dans un plan.

2.4.3.2 Diagrammes de chromaticité CIE 1931

La représentation graphique des coordonnées de chromaticité dans un système rectangulaire de coordonnées donne le diagramme de chromaticité (x, y) également dénommé diagramme de chromaticité CIE (x, y) 1931 (Baniya, 2012), tel qu'illustré à la figure 2.4. La courbe joignant 380 nm à 700 nm représente l'ensemble des couleurs pures tandis que la droite passant du bleu (380) nm au rouge (700 nm) est appelée la droite des pourpres. La propriété principale de ce diagramme est l'additivité. Il englobe l'ensemble des couleurs du spectre visible. Les couleurs reproductibles à partir des trois primaires rouges (700 nm), vert (546,1 nm) et bleu (435,8 nm) sont contenues dans le triangle formé par ces trois primaires. Le blanc de référence est lui-même défini par ses coordonnées de chromaticité dans le système CIE 1931 sur le diagramme de chromaticité. Le diagramme possède de nombreuses propriétés intéressantes sur la perception de la couleur en fonction de l'illuminant et permet d'identifier l'ensemble des couleurs reproductibles et de prédire l'apparence d'une couleur en fonction du blanc de référence, d'où la nécessité de pouvoir caractériser ce blanc de référence par ses coordonnées dans la pratique.

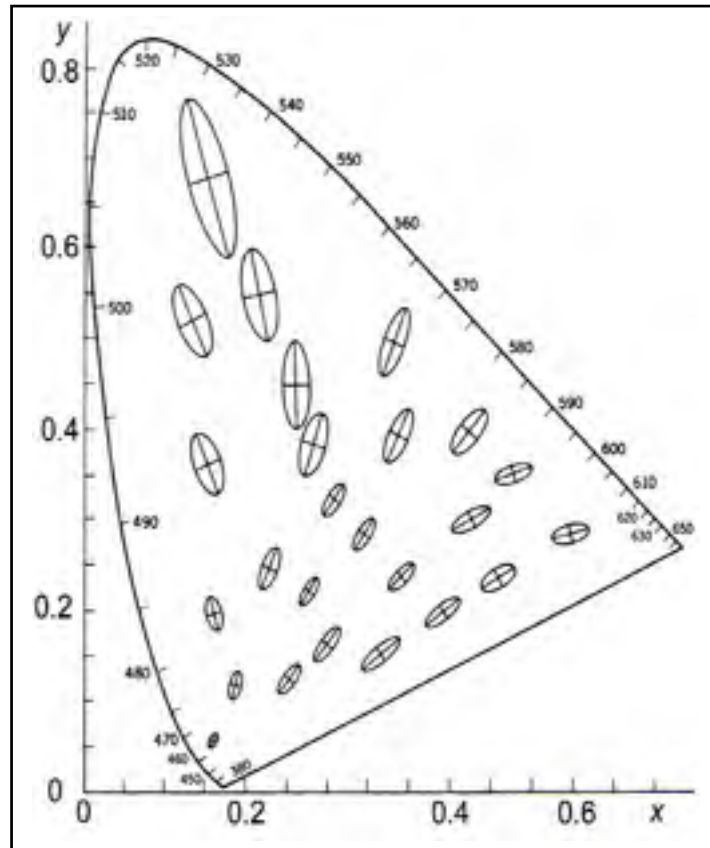


Le système de primaires XYZ CIE 1931 constitue ainsi la base de la colorimétrie. Cependant, il ne prend pas en compte la notion de luminosité, d'où la nécessité en plus d'indiquer les coordonnées de chromaticité x et y , d'ajouter la luminosité Y .

Figure 2.4 Diagramme de chromaticité CIE (x,y) 1931 à 2°
Tirée de Gillet (2008-2009)

2.4.3.3 Diagrammes de chromaticité uniformes: ellipses de MacAdam

L'inconvénient majeur du diagramme de chromaticité CIE (x, y) 1931 réside au fait que les couleurs n'y sont pas réparties selon la perception humaine. La distance entre deux couleurs représentées sur le diagramme n'est pas systématiquement proportionnelle à la différence perçue par l'homme entre ces deux couleurs. En 1942, David MacAdam a démontré que le minimum de variation de chromaticité perceptible par un sujet moyen dans le diagramme de chromaticité CIE 1931 se présente sous forme de petites aires de forme elliptique comme illustré à la figure 2.5. Ces petites aires sont connues sous le nom d'ellipses de MacAdam et chacun contient un ensemble de couleurs non discernables de celle située au centre de



l'ellipse par l'observateur standard. Il est possible de remarquer à partir de la figure 2.5 que la variation de chromaticité correspondant au minimum perceptible dépend de la position au niveau du diagramme de chromaticité CIE 1931.

Figure 2.5 Ellipses de MacAdam
Tirée de Schanda (2007)

Les différences d'orientation et de taille des ellipses de MacAdam illustrent clairement que le diagramme de chromaticité CIE (x, y) 1931 n'est pas uniforme.

Pour rendre le diagramme de chromaticité plus uniforme, la CIE a défini en 1960 un diagramme amélioré connu sous le nom du diagramme de chromaticité CIE (u, v) 1960 puis en 1976, le diagramme de chromaticité uniforme CIE (u', v') 1976, obtenu par accroissement de la coordonnée v de 50%, dans lequel les zones représentant le minimum de différence de couleur discernable par l'observateur moyen (ellipses de MacAdam) sont illustrées à la figure 2.6. On peut remarquer que les ellipses de MacAdam dans ce diagramme ont tendance à avoir une forme circulaire comparée à ceux observés dans le diagramme CIE (x, y) 1931.

Ceci se traduit par le fait que, bien que ces ellipses n'y soient pas totalement transformées en cercles, le diagramme CIE (u' , v') 1976 est un peu plus uniforme que celui CIE (x , y) 1931.

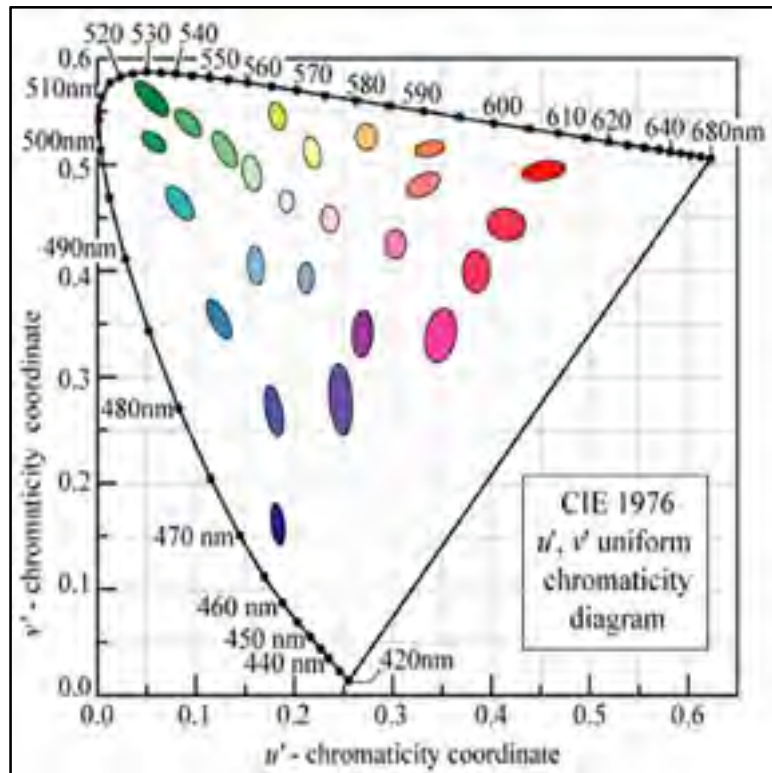


Figure 2.6 Allure des ellipses de MacAdam dans le diagramme CIE (u' , v') 1976
Tirée de Wikipédia (2014)

D'autres systèmes tels que les espaces de couleurs uniformes CIE UVW, CIEL*a*b* et CIEL*u*v* ont été adoptés pour les mêmes raisons qui ont conduit à l'adoption des diagrammes de chromaticité uniforme: palier à la non-uniformité des systèmes colorimétriques précédents. Le système de coordonnées (ou espace) CIE UVW n'est plus à jour bien qu'il ait longtemps servi pour le calcul de l'indice de rendu de couleurs (CRI) de la CIE (CIE, 2004). Quant aux espaces CIELAB et CIELUV, ils sont destinés pour la comparaison des différences entre les couleurs d'objets de même dimension et de formes identiques, vus dans un environnement identique pouvant varier du blanc au gris-intermédiaire, par un observateur photopique adapté à un domaine de chromaticité pas trop différent de celui de la moyenne de la lumière du jour.

CHAPITRE 3

ILLUMINANTS ET SOURCES DE LA CIE

3.1 Introduction

Avant l'éclairage artificiel, la courbe de la distribution spectrale de puissance (ou Spectral Power Distribution; SPD, en anglais) et la température de couleur étaient utilisées pour décrire certaines caractéristiques des sources lumineuses telles que le rendu de couleur des objets (Dangol, 2011). Avec le développement et la multiplicité des sources artificielles, il nous arrive parfois de voir deux sources ayant des SPDs mais des températures de couleurs égales, ce qui a été à l'origine de sérieux problèmes pour le concept de rendu de couleur (CIE, 1999). Il devient nécessaire de définir des règles pour normaliser l'utilisation des sources lumineuses afin de garantir des mesures fiables et reproductibles dans les différentes applications où elles sont utilisées. Parmi ces règles, les illuminants standard occupent une place primordiale.

3.2 Température de couleur

La température de couleur peut paraître une notion un peu étrange car il ne semble pas exister une relation directe entre la couleur et la température. Cette relation est dérivée de la radiation du corps noir (radiateur de Planck). En élevant graduellement la température du corps noir, ce dernier émet de l'énergie progressivement dans le rouge, dans l'orange, dans le blanc-jaunâtre, dans le blanc et en fin dans le blanc-bleuté. La température de couleur d'une source, exprimée en degrés Kelvin ($^{\circ}\text{K}$) est la température du radiateur de Planck dont la radiation est de même couleur que la source de lumière (CIE, 1999). La représentation graphique des différentes couleurs du corps noir sur le diagramme de chromaticité CIE 1931 est une courbe connue sous le nom de locus du corps noir ou locus de Planck. La température de couleur ne spécifie que la chromaticité d'une source. Cette chromaticité traduit la couleur apparente des sources lumineuses, "*chaude*" pour des valeurs de température de couleur faibles et "*froid*" pour des valeurs de température de couleur élevées (Schanda, 2007; CIE,

2004). La figure 3.1 donne le profil du locus de Planck ainsi que quelques isothermes dans le système de coordonnées CIE (u' , v') 1976.

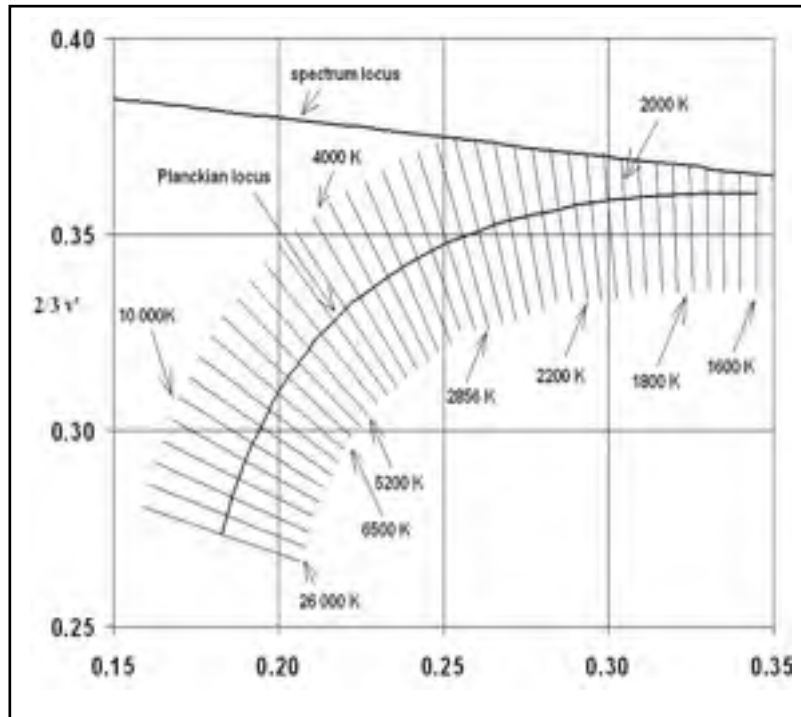


Figure 3.1 Locus de Planck avec quelques isothermes dans le diagramme de chromaticité CIE (u' , v') 1976
Tirée de Schanda (2007)

Lorsque la chromaticité de la source test ne correspond pas exactement à celle d'un corps noir, on utilise la température de couleur proximale (TCP) ou température de couleur corrélée ("*Correlated Color Temperature*"; CCT, en anglais) aussi exprimée en degrés Kelvin. La CIE définit la TCP de la manière suivante:

"La température de couleur proximale est la température du radiateur de Planck ayant la chromaticité la plus proche de celle associée à une distribution spectrale donnée dans le diagramme de chromaticité u' , $2/3v'$ où le locus de Planck et le stimulus test sont représentés" (Dangol, 2011).

Le tableau 3.1 donne l'impression liée à la température de couleur proximale dans le diagramme de chromaticité CIE (x, y) 1931.

Tableau 3.1 Impression liée à la température de couleur proximale dans le diagramme de chromaticité CIE (x, y) 1931
Tiré de Mottier (2008)

| Impression colorée | Température de couleur proximale (TCP) |
|--------------------|---|
| Chaude | $\leq 3300\text{ K}$ |
| Neutre | $3300\text{ K} \leq TCP \leq 5300\text{ K}$ |
| Froide | $< 5300\text{ K}$ |

La détermination graphique de la TCP n'est pas valable avec le système XYZ CIE 1931 à cause de sa non-uniformité déjà évoquée dans les sections précédentes. Aussi, la CIE recommande de ne pas utiliser le concept de TCP pour des différences de chromaticité ΔC entre la source test et le locus de Planck supérieures à 5×10^{-2} (CIE, 2004) car en dehors de cette limite, la source commence à donner une autre impression de couleur qui ne lui permettra plus d'être associée à une température du radiateur de Planck. La valeur de ΔC est calculée en utilisant l'équation 3.1.

$$\Delta C = \sqrt{(u'_t - u'_p)^2 + \frac{9}{4}(v'_t - v'_p)^2} \quad (3.1)$$

Avec

ΔC : différence de chromaticité entre la source teste et le radiateur de Planck ou phase de la lumière du jour dans le système CIE (u' , v') 1976;

u'_t et v'_t : coordonnées de chromaticité de la source teste;

u'_p et v'_p : coordonnées de chromaticité du radiateur de Planck.

Comme la température de couleur, la TCP ne reflète uniquement que la couleur de la lumière et n'informe en rien sur le spectre ou sur la qualité d'une source lumineuse.

3.3 Illuminants de la CIE

3.3.1 Notion d'illuminant

Le terme "*illuminant standard*" réfère à un ensemble de données en fonction de la longueur d'onde $S_{il}(\lambda)$ (énergie ou puissance relative) reproductible qui représente la meilleure qualité spectrale d'un type de source et qui est destiné à être utilisé dans des logiciels et d'autres applications colorimétriques (HunterLab, 2008). Chaque source correspond à une unique courbe de SPD qui décrit comment elle apparaît ou, mieux, comment apparaissent les objets qu'elle illumine. Les paramètres colorimétriques ainsi que le profil spectral de la lumière associés à un illuminant standard ou à ceux des objets qu'il illumine vus par un observateur étalon sont considérées comme des éléments de référence.

3.3.2 Illuminants de la CIE

La forte corrélation entre la couleur observée d'un objet et la source lumineuse qui l'éclaire oblige une catégorisation des différents illuminants en fonction de leur température de couleur. Une échelle de température de couleur a été créée à partir de la couleur du corps noir sous différentes températures exprimées en degrés Kelvin. Cette échelle de température est la base des illuminants de la CIE.

3.3.2.1 Illuminants classiques de la CIE

Les premiers illuminants de la CIE, de type tungstène, sont normalisés suivant les illuminants A, B ou C. Une série dite d'illuminants type F (pour fluorescent) est divisée en 12 sous-familles en fonction du type de phosphore utilisé est rajoutée plus tard. Il existe également l'illuminant E, qui est un illuminant théorique équiénergétique. La figure 3.2 donne les SPDs des illuminants A, B, C et E et le tableau 3.1 résume les caractéristiques colorimétriques de ces derniers, les détails sur les caractéristiques colorimétriques des illuminants de la série F sont données à l'annexe I.

L'«*International Practical Temperature Scale*» (IPTS) fut changée en 1948 mais, à l'issue de la 12^{ème} session de la CIE (1951), il a été décidé de conserver la SPD de l'**illuminant normalisé A** inchangée (Koszttyán and Schanda, 2013). Ce qui a conduit à la révision de sa définition comme une lampe à filaments de tungstène remplis de gaz fonctionnant à une température de couleur voisine de 2854 K. Le second changement de l'IPTS en 1968 donne la valeur 2856 K connue de nos jours et a entraîné des modifications similaires sur les TCP de tous les autres illuminants et sources recommandés par la CIE (Koszttyán and Schanda, 2013).

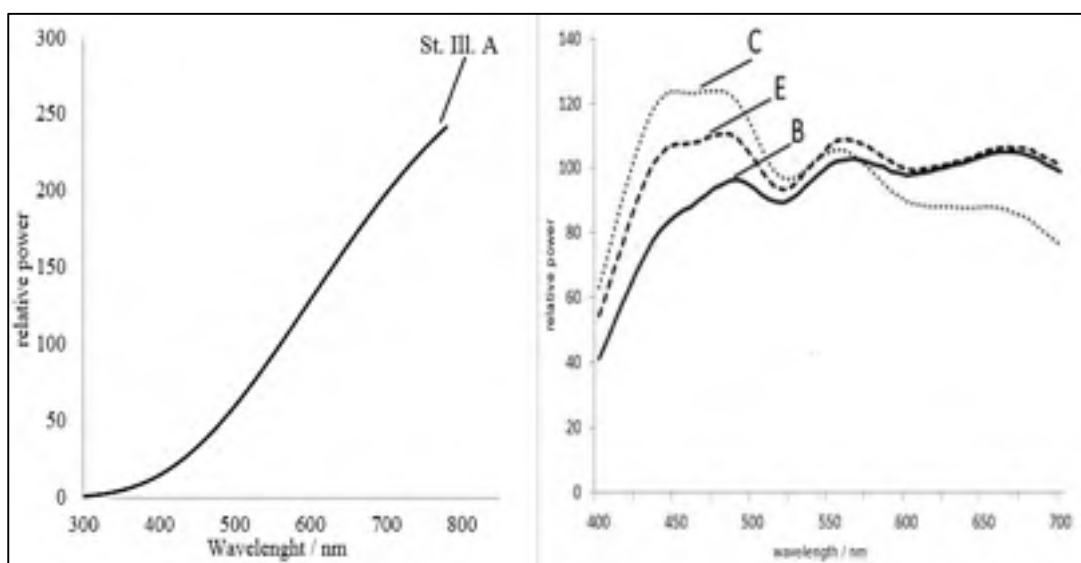


Figure 3.2 Profils spectraux des SPDs des illuminants A, B, C et E de la CIE
Adaptée de CIE (2013)

Le développement des applications colorimétriques et de la mesure ont dévoilé très tôt les limitations de ces illuminants. Dès 1963, la Commission de la CIE s'occupant de la colorimétrie reconnaissait qu'il y avait suffisamment de preuves disponibles pour substituer les illuminants de la CIE existants par de nouveaux illuminants adaptés représentant la lumière naturelle du jour (CIE, 2013). Ces nouveaux illuminants dénommés illuminants de type D ou de la série D (pour "*Daylight*" en anglais) sont associés à certaines phases de la lumière naturelle du jour.

Tableau 3.2 Illuminants classiques de la CIE
Adapté de Kránicz et al (2000), HunterLab (2008) et CIE (2013)

| Nom | Description | TCP (°K) | x | y | u' | v' |
|----------------------|--|----------|-------|-------|-------|-------|
| A | Lampe tungstène, couleur orange pour éclairage domestiques | 2856 | 0.448 | 0.407 | 0.256 | 0.524 |
| B | Lampe tungstène, couleur lumière du soleil au zénith | 4874 | 0.348 | 0.352 | 0.214 | 0.485 |
| C² | Lampe tungstène, couleur ciel nordique | 6774 | 0.310 | 0.316 | 0.201 | 0.461 |
| E | Point blanc théorique | 5400 | 0.333 | 0.333 | n/sp | n/sp |

3.3.2.2 Illuminants de type lumière du jour

On peut supposer que la vraie couleur des objets de notre environnement et la source d'énergie la plus sûre sont celles obtenues à partir de l'illumination par la lumière du jour (Schanda, 2007; CIE, 2013). Cependant, cette lumière du jour est en changement continu dépendamment de l'heure de la journée, de la saison, de la localisation et selon que le ciel est bleu ou couvert (totalement ou partiellement) par des nuages. Les professionnels de la colorimétrie et les artistes ont préféré depuis des siècles la lumière du jour en ciel nordique et son utilisation était bien courante dans l'environnement scientifique et industriel nord-américain bien avant que la CIE adopte ses illuminants du jour (CIE, 2013). Cependant, la lumière du jour en ciel nordique n'est pas constante et sa température de couleur peut varier de moins de 5.000 K à 25.000 K, et selon MacLaren (CIE, 2013) *"partout où la lumière du jour est utilisée pour la correspondance de couleur, il sera mieux d'utiliser la globale (lumière moyenne du jour dans le temps et dans l'espace) que juste d'utiliser celle de l'hémisphère nord...."*.

² La température de couleur de l'illuminant C a très souvent été rapporté comme 6 500 K (même dans Judd et al. 1964), mais la valeur correcte est un peu plus élevée, 6 740 K selon Davis et al. (1953), ou d'environ 6 800 K (CIE, 2004).

Bien que la lumière globale du jour varie d'un mélange de rayonnement solaire radieux avec un ciel bleu-profond à une lumière issue d'un ciel totalement couvert, sa température de couleur est plus ou moins stable comparée à celle du ciel dans l'hémisphère nord, les valeurs rencontrées dans la littérature sont comprises entre 5.620 K et 8.000 K; Taylor et Kerr (1941) (CIE, 2013) ont établi que l'intervalle normal est de 6.000 K à 7.000 K. La figure 3.3 montre que les illuminants associés aux phases de la lumière du jour sont disposés sur une courbe plus ou moins parallèle au locus de Planck dans le système CIE (u, v) 1960.

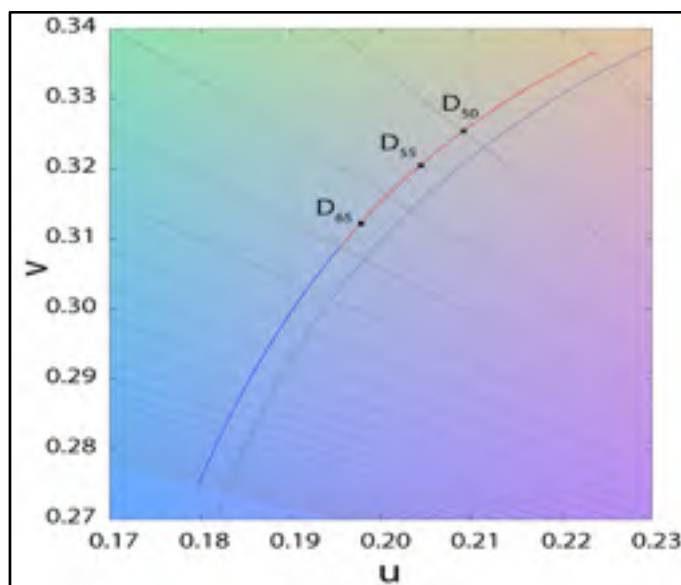


Figure 3.3 Position du locus des illuminants de la série D par rapport à celui de Planck dans le système CIE 1960 UCS ³
Tirée de Wikipédia (2014)

³ Les isothermes sont perpendiculaires au locus de Planck. Les deux sections du locus des illuminants de la série D (4000 -7000 K et 7000- 25000 K), sont codées en couleur. Noter que les deux locus sont séparés par une distance d'environ $\Delta uv = 0,003$.

A. L'illuminant normalisé D_{65} de la CIE

Le choix de la température à laquelle l'illuminant "*lumière du jour*" doit être utilisé dépend du type d'application. L'illuminant D_{65} semble avoir émergé comme le premier choix de la CIE (le seul à avoir le statut d'illuminant normalisé) car il représente le meilleur compromis entre les extrêmes D_{50} et D_{75} et de plus, parce qu'il offre une sorte de meilleure continuité des TCP autour de 6.800 K que le précédent illuminant du jour recommandé, l'illuminant C qui n'était défini que dans le domaine visible du spectre (Schanda, 2007; CIE, 2013) .

Un standard de la CIE stipule que :

"L'illuminant standard D_{65} de la CIE est destiné à représenter la moyenne de la lumière du jour et à une température de couleur proximale voisine de 6.500 K. L'illuminant standard D_{65} de la CIE devra être utilisé dans toutes les applications colorimétriques nécessitant la représentation de la lumière du jour, à moins qu'il y ait des raisons spécifiques qui justifient l'utilisation d'un illuminant différent. On sait qu'il peut se produire des variations de la distribution spectrale de puissance relative de la lumière du jour, particulièrement dans la région ultraviolette du spectre, dépendamment de la saison, de l'heure de la journée et de la position géographique. Malgré tout, l'illuminant standard D_{65} de la CIE devra être utilisé en attendant la disponibilité d'informations additionnelles sur ces variations" (Schanda, 2007).

En 1964, la CIE statue que:

"Il est recommandé dans l'intérêt de standardisation, que le D_{65} soit utilisé chaque fois que c'est possible. Lorsque l'utilisation du D_{65} n'est pas possible, il est recommandé d'utiliser un des illuminants D_{50} , D_{55} , ou D_{75} . Lorsqu'aucun de ces illuminants du jour ne peut être utilisé, l'illuminant du jour à la température de couleur proximale nominale peut être déterminé en utilisant les équations [indiqué ci-dessus]" (CIE, 2004; CIE, 2013).

La SPD de la phase de la lumière du jour représentée par l'illuminant normalisé D_{65} de la CIE ne devrait être réfléchié par aucun objet fortement coloré (mur rouge brique ou arbre vert) (ISO TC 34/SC 12, 2007). Les valeurs originales de cette SPD sont données dans la publication «*CIE standards illuminant for colorimetry*» (CIE, 1986c). L'illuminant normalisé D_{65} de la CIE est également référencé dans les normes ISO: 3668, ASTM 1729 et DIN6173-2; (DIN abréviation du terme allemand «*Deutsches Institut Für Normung*»). Son utilisation dans de nombreuses applications émergentes telles que le photovoltaïque, la mesure de la fluorescence des objets et l'étude du vieillissement des organismes vivants a suscité grandement l'intérêt de porter notre étude sur ce dernier.

B. Caractéristiques de l'illuminant normalisé D_{65} de la CIE

Coordonnées colorimétriques

Les phases de la lumière du jour ont été déterminées sur un intervalle de TCP allant de 4.000 K à 25.000 K divisé en deux sections de 4.000 K à 7.000 K et 7.000 K à 25.000 K pour le calcul de leur coordonnées de chromaticité (x_D, y_D) dans l'espace CIE (x, y) 1931 (Schanda, 2007). Ces coordonnées de chromaticité, pour être définies, doivent satisfaire aux équations 3.2 et 3.3 (Kránicz and Schanda, 2000) connue sous le nom de "*relation quadratique de Judd*":

$$y_D = -3,000x_D^2 + 2,870x_D - 0,275 \quad (3.2)$$

$$\text{Avec} \quad 0,250 \leq x_D \leq 0,38 \quad (3.3)$$

La TCP d'un illuminant D est reliée à sa coordonnée x_D par l'une des équations 3.4 et 3.5 (Kránicz and Schanda, 2000; CIE, 2004) tenant compte des isothermes normales au locus de Planck dans un diagramme de chromaticité uniforme.

- Pour $4.000 \text{ K} \leq TCP \leq 7.000 \text{ K}$

$$x_D = \frac{-4,6070 * 10^9}{(TCP)^3} + \frac{2,9678 * 10^6}{(TCP)^2} + \frac{0,09911 * 10^3}{TCP} + 0,244063 \quad (3.4)$$

- Pour $7.000\text{ K} \leq T_{CP} \leq 25.000\text{ K}$

$$x_D = \frac{-2,0064 * 10^9}{(TCP)^3} + \frac{1,9018 * 10^6}{(TCP)^2} + \frac{0,24748 * 10^3}{TCP} + 0,237040 \quad (3.5)$$

Les coordonnées de chromaticité de chaque illuminant sont obtenues en remplaçant TCP par sa valeur. La difficulté liée à cette méthode est qu'en dehors des nombreuses approximations établies, elle ne prévoit pas de calculer les coordonnées de chromaticité (x, y) des autres illuminants du jour. Judd et ses coéquipiers n'ont calculé que les valeurs de coordonnées de chromaticité correspondant à des TCPs d'utilisation courante (5.000 K, 6.500 K), et 7.500 K pour celles correspondant aux autres valeurs de TCP, on pourrait se référer aux figures de Kelly (Wikipédia, 2014a). Le tableau 3.4 donne les caractéristiques colorimétriques des illuminants recommandés de type "*lumière du jour*" les plus couramment utilisés et de l'illuminant standard D₆₅ de la CIE. La révision de la valeur de la constante de Planck après la définition de cette série a induit un léger changement de la TCP de chaque illuminant D qui passe de la valeur nominale à sa valeur actuelle.

Tableau 3.3 Caractéristiques colorimétriques des illuminants de type "lumière du jour"
Adapté de CIE (2004); Chherawala (2007) et de Schanda (2007)

| Dénomination | Illuminant D ₅₀ | Illuminant D ₅₅ | Illuminant Standard D ₆₅ | Illuminant D ₇₅ |
|-----------------|--|---|---|----------------------------|
| Description | Lumière du jour au lever ou au coucher du soleil (impression et art) | Lumière du jour mi-matinée ou mi-après-midi | Lumière du jour à midi (colorimétrie et autres) | Ciel nuageux |
| T Nominale (°K) | 5000 | 5500 | 6500 | 7500 |
| T Actuelle (°K) | 5003 | 5504 | 6504 | 7503 |
| x | 0.34567 | 0.33243 | 0.31272 | 0.29903 |
| y | 0.35851 | 0.34744 | 0.32903 | 0.31488 |
| u' | 0.209 | 0.204 | 0.198 | 0.193 |
| v' | 0.488 | 0.480 | 0.468 | 0.458 |

Distribution spectrale relative de puissance (SPD)

Les valeurs de la SPD relative de l'illuminant normalisé D_{65} et celles des autres illuminants de la série D de la CIE fournies dans la recommandation "*Colorimetry*" de la CIE sont basées sur des observations expérimentales dans le domaine spectral 330 – 700 nm suivies d'une extrapolation dans les domaines de longueur d'onde 300 - 330 nm puis 700 – 830 nm (Judd et al. 1964). On croit que les valeurs obtenues d'extrapolation sont assez précises pour une utilisation en colorimétrie mais ne devraient pas être utilisées à d'autres fins (CIE, 2004). La SPD relative $S_D(\lambda)$ d'un illuminant de la série D peut être déduite de ses coordonnées de chromaticité (x_D, y_D) dans le système CIE (x, y) 1931 (Wikipédia, 2014a). Judd et al. avaient suggéré une nouvelle approche, basée sur les méthodes de Simonds (Simonds, 1583; CIE, 2013), pour compiler des données expérimentales sous forme de vecteurs caractéristiques (ou vecteurs propres) $S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$ et $S_2(\lambda)$ par pas de 10 nm entre 300 nm et 830 nm à partir desquels ils ont calculé la SPD relative de la lumière du jour à n'importe quelle TCP. Une approximation des SPDs relatives des différentes illuminants de la "*lumière du jour*" à des pas de 10 nm entre 300 nm et 830 nm est donnée par l'équation 3.6.

$$S_D(\lambda) = S_0(\lambda) + M_1 S_1(\lambda) + M_2 S_2(\lambda) \quad (3.6)$$

$S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$ et $S_2(\lambda)$ sont des fonctions dépendant de la longueur d'onde λ telles que:

$S_0(\lambda)$: Valeur moyenne des SPDs de 622 échantillons utilisées pour déterminer la SPD des illuminants de la série D;

$S_1(\lambda)$ Variation du jaune-bleu en fonction du changement de la TCP lié à la présence ou l'absence de nuages et/ou du soleil au zénith;

$S_2(\lambda)$ Variation rose-vert due à la présence d'eau sous forme de vapeur ou brume.

Les figures 3.4 et 3.5 donnent respectivement les courbes représentant les profils spectraux des fonctions $S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$ et $S_2(\lambda)$ normalisées et de la SPD de l'illuminant normalisé D_{65} de la CIE.

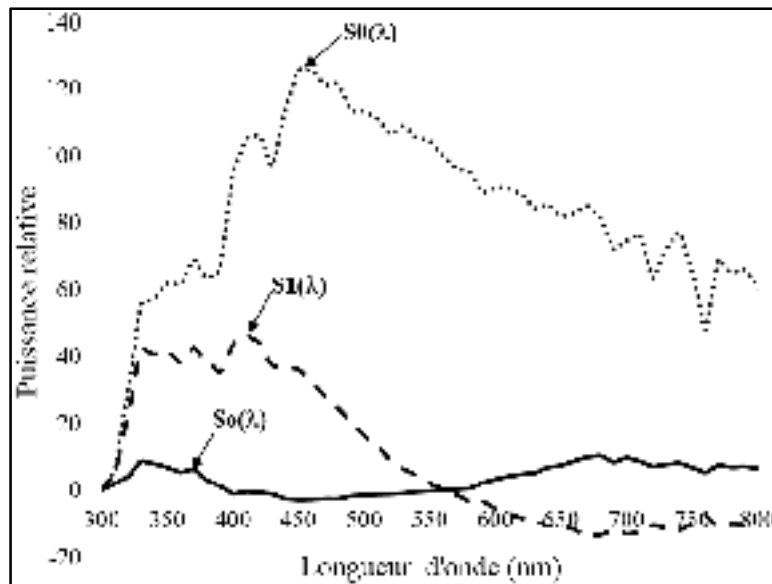


Figure 3.4 Profils spectraux des fonctions $S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$ et $S_2(\lambda)$
Tirée de CIE 204-2013 (2013)

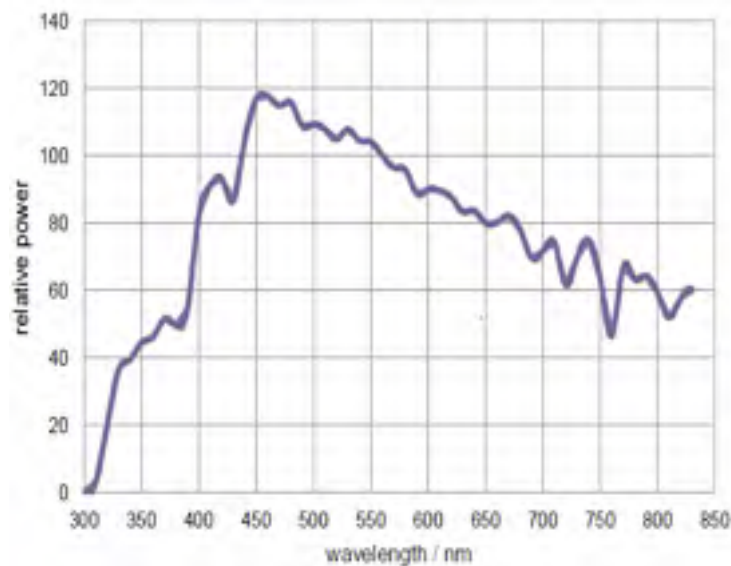


Figure 3.5 Profil spectral polissé de la SPD de
l'illuminant normalisé D_{65} de la CIE
Tiré de CIE 204-2013 (2013)

Des tables du dernier rapport technique sur la colorimétrie de la CIE (CIE 2004) donnent les valeurs de l'illuminant normalisé D_{65} ainsi que celles des autres illuminants recommandés (D_{50} , D_{55} , D_{75}) par pas de 5 nm obtenues par interpolation linéaire des données initiales. Ces

valeurs sont en accords avec celles à six chiffres significatifs par pas de 1 nm entre 300 nm et 830 nm données dans le rapport de la CIE (CIE 2006), obtenues également par interpolation linéaire (Kránicz and Schanda, 2000; Kosztyán and Schanda, 2013). Les valeurs nulles de S_1 et S_2 à la longueur $\lambda = 560$ nm s'expliquent par le fait que toutes les SPDs sont normalisées au voisinage de cette longueur d'onde. La CIE recommande de déterminer les valeurs de SPD aux autres longueurs d'onde comprises entre 300 nm et 830 nm par interpolation lorsque plus de précision est nécessaire. Les facteurs M_1 et M_2 donnés par les équations 3.6 et 3.7 ne sont pas considérés comme des constantes car ils dépendent des coordonnées de chromaticité x_D et y_D qui sont fonction de la TCP choisie (Dean and al., 1964) et leurs valeurs pour un échantillonnage à 10 nm d'intervalles sont données par les équations 3.7 et 3.8 (Kránicz and Schanda, 2000; CIE, 2013).

$$M_1 = \frac{-1,3515 - 1,7703x_D + 5,9114y_D}{0,0241 + 0,2562x_D - 0,7341y_D} \quad (3.7)$$

$$M_1 = \frac{-1,3515 - 1,7703x_D + 5,9114y_D}{0,0241 + 0,2562x_D - 0,7341y_D} \quad (3.8)$$

Les constantes figurant dans ces équations dépendent de l'échantillonnage des fonctions $S_{i,0 \leq i \leq 2}$ et ont été déterminés à l'origine avec un échantillonnage de 10 nm d'intervalle (CIE, 2013).

La CIE recommande dans son rapport technique CIE-204 :2013 de 2013 une nouvelle redéfinition des profils spectraux des illuminants de la série D afin de réduire les incohérences notées dans les calculs colorimétriques impliquant ces derniers. Des détails sur ces nouvelles données spectrales des illuminants de la série D révisées sont donnés dans les annexes II à V.

Pour l'utilisation pratique de ses illuminants, la CIE a défini un certain nombre de sources pour les simuler.

3.4 Sources standards de la CIE

La distinction entre "*illuminant*" et "*source*" remonte pour la première fois en 1986 dans la publication 15.2 de la CIE (CIE 1986 qui fut remplacée par la publication CIE 15 2004) (CIE, 2013). Les sources permettent de palier d'une part aux problèmes liés à la non-uniformité du rayonnement solaire dans l'espace et dans le temps et aux difficultés ou à l'absence d'accès à ce rayonnement dans les endroits peu ou non desservis tout en garantissant une quasi-reproductibilité des données mesurées. La définition d'une source étant subsidiaire à celle de l'illuminant correspondant, il est possible que les nouveaux progrès, pour des usages de laboratoire, conduisent à des sources améliorées reproduisant les mesures de manière plus exacte et plus appropriée que tel ou tel illuminant. La CIE a défini plusieurs sources standards associées à ses anciens illuminants. La figure 3.6 fait une comparaison entre les concepts de source et d'illuminant.



Figure 3.6 Concept de sources et d'illuminants
Tirée de HunterLab (2008)

L'inconvénient d'une source est que la qualité et l'énergie de sa lumière ne sont, le plus souvent, pas décrites et peuvent varier, ce qui limite leur fiabilité du point de vue mathématique ou leur reproductibilité du point de vue technique. Aussi, il n'existe pour le

moment pas de source artificielle reconnue par la CIE comme équivalente à l'un des illuminants de la série D. Néanmoins, elle admet l'utilisation d'un certain nombre de sources dites simulateurs solaires dont les performances sont régies par des normes.

3.4.1 Source artificielle simulant l'illuminant normalisée A

La source standard A de la CIE est une lampe à filament de tungstène remplie de gaz représentant l'illumination du corps noir à une TCP d'environ 2856 K (CIE, 2004). Cette source n'est d'usage que dans des situations spécifiques comme dans le cas de l'étude du métamérisme d'objets colorés. Si l'utilisation de cette source dans le domaine UV est requise, une lampe dotée d'une enveloppe ou d'une fenêtre faite de quartz fondu ou de silicium doit être utilisée car le verre absorbe les radiations UV émises par le filament. (CIE, 2004). Concernant les illuminants B et C de la CIE, dès lors que ces derniers sont devenus obsolètes (Schanda, 2007), nous ne jugeons pas pertinent de s'attarder aux sources qui leur correspondent.

3.4.2 Sources simulant l'illuminant D₆₅ de la CIE

En ce qui concerne l'illuminant standard D₆₅, la CIE retient:

"Pour le moment, aucune source artificielle n'est certifiée pour représenter l'illuminant standard D₆₅. On espère que les nouveaux développements dans le domaine de la fabrication des LEDs et des filtres offriront suffisamment de possibilités pour une recommandation de la CIE" (CIE, 2004).

En attendant, la CIE a convenu une formule pour décrire la qualité d'un simulateur solaire pour la colorimétrie. Les sources usuelles pour lesquelles les performances en termes de simulation de la lumière du jour ont été évaluées selon les normes décrites dans la publication N° 51 de la CIE doivent être utilisées.

CHAPITRE 4

SIMULATEURS SOLAIRES ET LEURS TECHNIQUES DE CARACTERISATION

4.1 Introduction

Un simulateur solaire (ou soleil artificiel) est un dispositif destiné à reproduire une illumination semblable à celle du soleil dans des conditions particulières. L'objectif principal est de simuler la lumière du jour de manière contrôlable au sein des laboratoires d'essais pour des fins de tests de certains composants tels que des cellules ou écrans solaires, des matières plastiques et d'autres matériaux et dispositifs. Les lampes au xénon à haute pression et les tubes fluorescents de la "*lumière artificielle du jour*" fabriqués par General Electric avec un CRI de 92 sont largement utilisés comme approximation du D₆₅ (ISO TC 34/SC 12, 2007).

4.2 Présentation

Nous nous intéresserons juste à l'aspect global pour avoir une idée sur la forme (poids), les dimensions et les prix des simulateurs solaires haut de gamme commercialisés dans le marché. La figure 4.1 montre la photo du model 94063A de la gamme Sol3A des simulateurs solaires d'ORIEL INSTRUMENTS. L'ensemble comporte une lampe au xénon de 1.000 W qui représente la source d'illumination, un boîtier illuminateur pour protéger la lampe, un obturateur intégré, un filtre de masse d'air 1.5 G, un système d'alimentation finement stabilisé et d'autres composants optiques intégrés (Newport, 2014a). La figure 4.2 renseigne sur les dimensions de ce type de simulateur solaire. La valeur mise entre parenthèses est exprimée en millimètre (mm) et celle située au-dessus est donnée en pouces. Le model 94063A d'ORIEL INSTRUMENTS représente le model intermédiaire de ses simulateurs solaires de la gamme Sol3A en termes de dimensions du faisceau lumineux émis (152.4 x 152.4 mm) fonctionnant avec une source au xénon. Son prix est de l'ordre de \$ 47.000 en 2014 avant taxes.

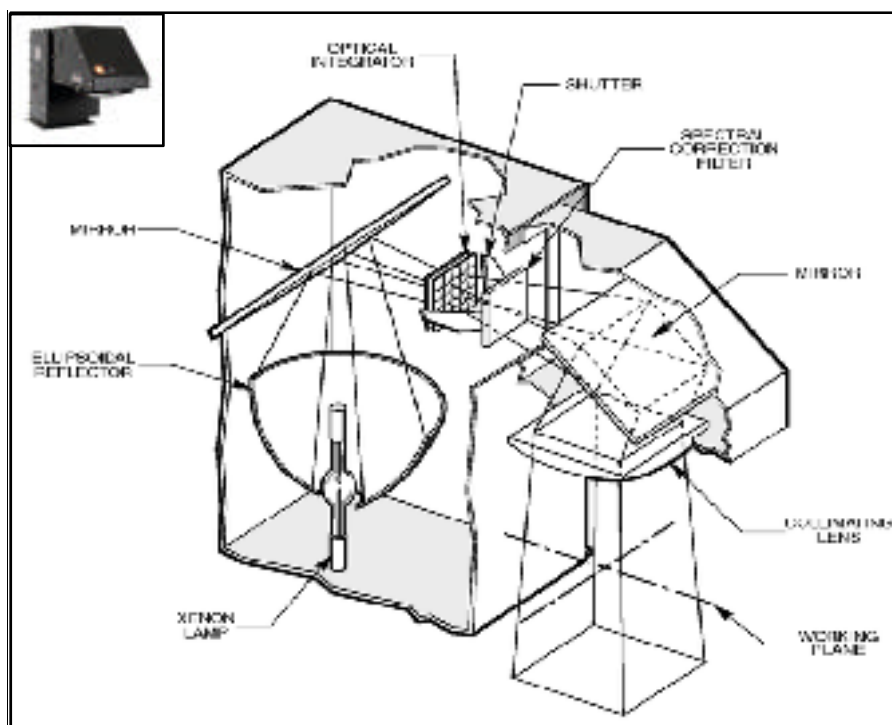


Figure 4.1 Model 94063A de la gamme Sol3A (insert haut gauche)
de simulateurs solaires d'Oriel Instruments
Tirée de Newport (2014a)

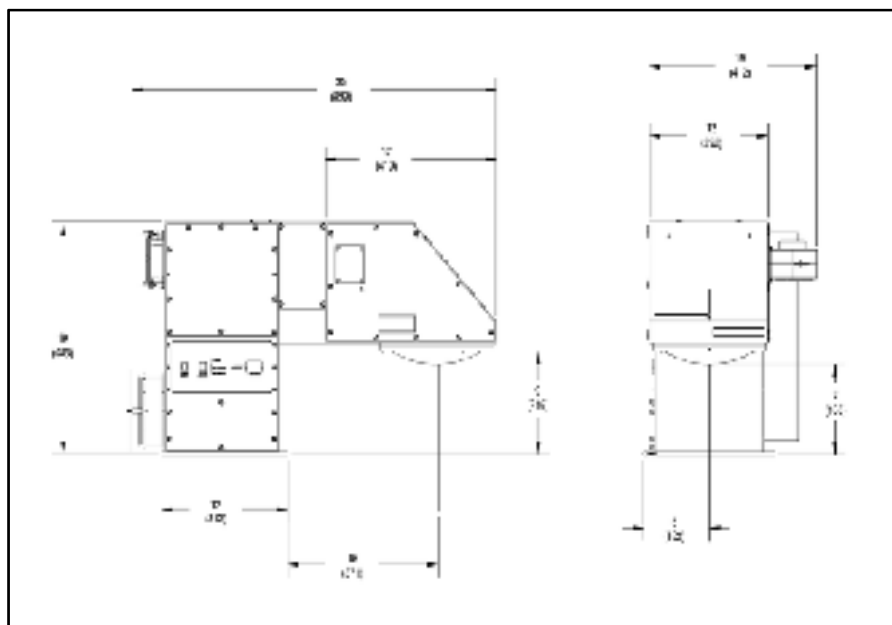


Figure 4.2 Dimensions en pouces (mm) du model 94063A de la gamme
Sol3A de simulateur solaire d'Oriel Instruments
Tirée de Newport (2014a)

4.3 Caractéristiques d'un simulateur solaire

Les simulateurs solaires sont caractérisés selon leur mode de fonctionnement, leur zone de couverture de la surface test et leurs propriétés spectrales.

4.3.1 Zone de couverture d'une surface test

La zone de couverture d'un simulateur solaire est évaluée par rapport à des aires test choisies comme standards. De manière habituelle, un simulateur solaire de zone de couverture inférieure ou égale à $30 \times 30 \text{ cm}^2$ (ou de diamètre inférieur ou égal à 30 cm pour le cas des formes circulaires) est dit simulateur solaire à petite zone de couverture. Dans le cas contraires, on parle de simulateurs solaires à large zone de couverture.

4.3.2 Mode de fonctionnement

Le mode fonctionnement d'un simulateur solaire se rapporte à la continuité de l'irradiance de sortie de la lumière qu'il émet lors d'un cycle test. Le cycle test est le temps nécessaire pour une mesure complète des caractéristiques courant-tension du système photovoltaïque. Ce paramètre joue un rôle fondamental dans les applications photovoltaïques car influe sur les temps de réponse de la cellule solaire et de l'acquisition des données. En se basant sur le standard ASMT E927-10, les simulateurs solaires peuvent être divisés en trois catégories:

Mode statique: Ce sont des simulateurs dont la fluctuation l'irradiance de sortie sur une durée de 100 ms n'excède pas les 5% de la valeur moyenne dans le domaine spectral considéré.

Mode mono-pulsé: Ce type de simulateur solaire a une irradiance de sortie dans une seule pulsation d'une durée inférieure ou égale à 100 ms.

Mode multi-pulsé: Dans ce cas de figure, l'irradiance de sortie reçue se présente sous forme d'une série périodique de pulsations lumineuses de courte durée. Le niveau d'irradiance entre deux pulsations consécutives peut ne pas forcément retomber à zéro.

Un simulateur statique dont la stabilité de l'irradiance tombe au-dessous de 5% de la valeur maximale dans un intervalle de temps de 100 ms peut être considéré comme un simulateur pulsé si les pulsations sont périodiques.

4.3.3 Profil spectral d'un simulateur solaire

Il existe plusieurs types de simulateurs solaires du point de vue SPD relative ou de géométrie de l'irradiance bien que leurs spectres puissent être modifiés par des filtres optiques. La performance d'un simulateur solaire du point de vue spectral est évaluée sur la base de trois critères fondamentaux: la concordance (ou "*match*") spectrale, la non-uniformité spectrale et l'instabilité temporelle de son irradiance comparés à celles d'un spectre de référence. Un des défis majeurs pour simuler l'énergie solaire est de reproduire aussi fidèlement que possible, les effets réels du soleil sur les produits ou composants photovoltaïques.

4.3.3.1 Spectres de référence

Le rayonnement solaire reçu à la surface de la terre varie considérablement avec la position géographique, les conditions atmosphériques (ciel nuageux, poussiéreux état de la couche d'ozone), l'heure de la journée, la distance Terre-soleil, l'activité et la rotation du soleil. Les nombreux facteurs influençant le spectre solaire justifient la nécessité de définir des spectres de référence. Les spectres de référence utilisés pour des applications de test et de caractérisation de cellules solaires photovoltaïques sont ceux établis par les organismes de ASTM, IEC et JIS dans leurs publications respectives ASTM E 927-10, 60904-9 Edition2 l'IEC (2007) et JIS C8912. Ces spectres de référence sont établis en tenant compte de la position du point test par rapport au soleil et de la longueur de parcours du rayon solaire dans l'atmosphère terrestre définies sous forme de mode "*Air Masse*" (AM). La figure 4.3 indique quelques modes de rayonnement selon l'inclinaison du rayon solaire par rapport à la position du soleil au zénith au niveau du point test (Newport, 2014b) et le tableau 4.1 donne, en pourcentage, la distribution spectrale de l'irradiance d'un spectre de référence pour quelques modes par intervalles de longueurs d'onde de 100 nm telle que défini dans la norme ASTM E927-10 (ASTM I, 2010; Newport, 2014b)

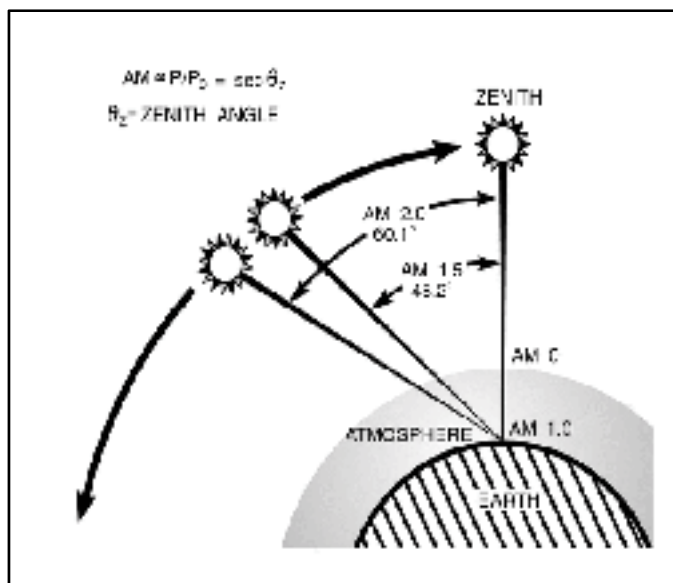


Figure 4.3 Dépendance du mode d'une phase de lumière du jour en fonction de l'inclinaison du rayon solaire par rapport au zénith
Tirée de Newport (2014b)

Tableau 4.1 Distribution spectrale de l'irradiance d'un spectre de référence pour quelques modes, donnée en pourcentage par intervalles de longueurs d'onde de 100 nm, telle qu'illustré dans la norme ASTM E927-10
Tiré d'ASTM 1 (2010)

| Intervalle de longueur d'onde (nm) | Pourcentage de l'irradiance totale | | |
|------------------------------------|------------------------------------|--------------------|----------|
| | Mode Direct AM1.5 | Mode Global AM 1.5 | Mode AM0 |
| 0,3 à 0,4 | Non spécifié | Non spécifié | 8,0 |
| 0,4 à 0,5 | 16,9 | 18,4 | 16,4 |
| 0,5 à 0,6 | 19,7 | 19,9 | 16,3 |
| 0,6 à 0,7 | 18,5 | 18,4 | 13,9 |
| 0,7 à 0,8 | 15,2 | 14,9 | 11,2 |
| 0,8 à 0,9 | 12,9 | 12,5 | 9,0 |
| 0,9 à 1,1 | 16,8 | 15,9 | 13,1 |
| 1,1 à 1,4 | Non spécifié | Non spécifié | 12,2 |

Ces normes, étaient destinées à l'origine à la caractérisation de cellules solaires photovoltaïques à base de silicium; c'est pourquoi le domaine spectral dans lequel elles sont définies correspond à la bande d'absorption de ce dernier. Néanmoins, ces définitions sont également adaptées à de nombreuses autres technologies photovoltaïques en dehors des concentrateurs solaires en raison de leur large bande d'absorption (300 - 1800 nm) (Wikipédia, 2014b). D'autres normes divisent le même domaine spectral en sept (ou plus) intervalles et le domaine spectral de l'irradiance du simulateur à caractériser doit être divisé de manière identique à celui de la norme par rapport à laquelle ses performances seront définies pour un mode donné. La réalisation et la caractérisation de simulateurs solaires pour des applications photovoltaïques sont établies sur la base de ces spectres de référence.

4.3.3.2 "Spectral match"

Le "*spectral match*" est le rapport, calculé par intervalle de longueur d'onde, de la densité spectrale de l'irradiance d'un simulateur solaire sur celle du spectre de référence. Il détermine le niveau de conformité de l'irradiance d'un simulateur solaire à celle prise comme référence de la phase de la lumière du jour considérée. Un simulateur solaire est d'autant plus performant du point de vue "*spectral match*" que ce ratio est proche de 1 dans le domaine spectral considéré.

4.3.3.3 Non-uniformité spatiale de l'irradiance

La non-uniformité spatiale S_{NE} traduit l'uniformité de la distribution spectrale de puissance d'un simulateur solaire sur une surface test. Elle est exprimée en pourcentage selon l'équation 4.1.

$$S_{NE} = 100\% * \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \quad (4.1)$$

E_{\max} et E_{\min} sont les valeurs maximale et minimale de l'irradiance du simulateur solaire mesurées par un détecteur à la surface du plan test.

4.3.3.4 Instabilité temporelle de l'irradiance

La méthode de calcul de l'instabilité temporelle T_{IE} est assez complexe car tient compte du mode de fonctionnement du simulateur solaire. Elle ne peut être déterminée pour le cas d'un simulateur solaire en mode pulsé que lorsque ce dernier est muni d'un système intégré d'acquisition de données. Ce système peut fonctionner en mode d'échantillonnage simultané ou séquentiel. L'équation 4.2 n'est applicable que pour un simulateur solaire fonctionnant en mode statique dont l'uniformité spatiale de l'irradiance varie moins de 5% durant une période de mesure des données courant-tension ($I = f(V)$) incluant le temps séparant les acquisitions des données de l'irradiance, du courant et de tension (ASTM I, 2010).

$$T_{IE} = 100\% * \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \quad (4.2)$$

E_{\max} et E_{\min} représentent respectivement les valeurs maximale et minimale de l'irradiance du simulateur solaire mesurées par un détecteur en un point particulier de la surface du plan test durant un temps d'acquisition fixé. Un fabricant doit spécifier le temps d'acquisition des données qui ont servi à la classification de l'instabilité temporelle. Des détails sur le calcul de l'instabilité temporelle de l'irradiance d'un simulateur solaire sont donnés à la référence (ASTM I, 2010).

4.4 Techniques de caractérisation et classification des simulateurs solaires

4.4.1 Techniques de caractérisation

Il existe deux méthodes principales pour caractériser un simulateur solaire. Une méthode quantitative basée sur la détermination de l'indice de rendu de couleur et des indices de métamerisme et une méthode qui consiste à déterminer, du point de vue spectral, le niveau de conformité des caractéristiques du simulateur solaire à celles, jugées idéales, de la phase de la lumière du jour à représenter. Ce type de classification concerne le plus souvent des applications telles que la calibration et la simulation d'instruments, de systèmes ou l'étude de la fluorescence d'échantillons.

4.4.1.1 Méthodes quantitatives

A. Indice de rendu de couleur (CRI)

L'indice de rendu de couleurs (CRI) est la seule échelle de mesure mondialement acceptée et la plus répandue pour évaluer la performance des sources lumineuses en termes de rendu de couleurs. Cette échelle de mesure dont les valeurs sont comprises entre 0 à 100 (du noir au blanc standard) permet d'identifier une source lumineuse sur la base de sa capacité d'afficher une couleur avec la précision qu'elle aurait sous illumination par une source de référence en tenant compte des erreurs engendrées par les ellipses de MacAdam. Cette méthode a défini huit échantillons de couleurs test de base (TCSs pour "*Test Color Samples*" en anglais) qui se partagent le cercle des teintes (saturations modérées et luminosités comparables) et six autres supplémentaires que sont le rouge vif, le jaune vif, le vert vif, bleu vif, le rose-jaunâtre et vert-olive modéré, tous sélectionnés à partir de la compilation de couleurs de Munsell (Chalmers and Soltic, 2010). Le tableau 4.2 donne les notations approximatives de Munsell associées à ces échantillons de couleur, ainsi que leur couleur apparente sous l'illumination de la lumière du jour.

Calcul de l'indice de rendu de couleur

Pour calculer le l'indice de rendu de couleur, la première étape consiste à déterminer la TCP de la source test pour le choix de l'illuminant de référence. Un choix judicieux de cette TCP est recommandé car la transformation de l'adaptation chromatique ne s'adapte pas aux grandes différences de chromaticité (Schanda, 2003); la différence de chromaticité entre la source test et l'illuminant de référence doit être inférieure à $5,4 \times 10^{-2}$ dans le système CIE 1960 UCS afin d'obtenir des résultats significatifs (Schanda, 2007; Dangol, 2011). Une fois l'illuminant de référence déterminé, l'objectif est de comparer les couleurs de chaque TCS obtenues sous illumination par la source test puis par l'illuminant de référence.

Tableau 4.2 Échantillons de couleur tests de la CIE utilisés pour le calcul du CRI
Adapté de Chalmers and al. (2010)

| TCS N° | Approximate Munsell Notation | Colour appearance under daylight |
|--------|------------------------------|---|
| 1 | 7.5 R 6/4 | Light greyish red |
| 2 | 5 Y 6/4 | Dark greyish yellow |
| 3 | 5 GY 6/8 | Strong yellow green |
| 4 | 2.5 G 6/6 | Moderate yellow green |
| 5 | 10 BG 6/8 | Light bluish green |
| 6 | 5 PB 6/8 | Light blue |
| 7 | 2.5 P 6/8 | Light violet |
| 8 | 10 P 6/8 | Light reddish purple |
| 9 | 4.5 R 4/13 | Strong red |
| 10 | 4 Y 8/10 | Strong yellow |
| 11 | 4.5 G 5/8 | Strong green |
| 12 | 3 PB 3/11 | Strong blue |
| 13 | 5 YR 8/4 | Light yellowish pink (human complexion) |
| 14 | 5 GY 4/4 | Moderate olive green (leaf green) |

Pour ce faire, on détermine les valeurs de tristimuli de chaque TCS sous illumination par chacune des deux sources. On se retrouve avec deux groupes de valeurs de tristimuli $T_{i,l,t}$ et $T_{i,l,r}$ avec $i = 1$ pour X, $i = 2$ pour Y et $i = 3$ pour Z. L'indice t signifie source test et r l'illuminant de référence. Les TCSs sont indiqués par l'indice l ($0 \leq l \leq 14$, avec $l = 0$ indique la source test/illuminant de référence). La différence de chromaticité entre $T_{i,l=0,t}$ et $T_{i,l=0,r}$, c'est-à-dire entre les chromaticités des deux sources appelée "*variation adaptative de couleur*", est régie par la transformation de l'adaptation chromatique de von Kries (Schanda, 1998; Guillo, 2004; Dangol, 2011). Les différences de couleur $\Delta E_{i,l,r-t}$ entre $T_{i,l,r}$ et $T_{i,l,t}$ pour $1 \leq l \leq 14$ sont calculées en utilisant l'espace de couleur uniforme UCS CIE 1964. Il est clair que toutes les valeurs de $\Delta E_{i,l,r-t}$ ne sont nulles que si les SPDs de la source teste et de l'illuminant de référence sont parfaitement identiques. Il a été arbitrairement décidé que les sources fluorescentes blanc-chaudes aient un CRI de 50

(Schanda, 1998). En tenant compte de ces considérations, les indices de rendu de couleur spéciaux R_i sont calculés à partir des différences de couleurs suivant l'équation:

$$R_i = 100 - 4,6 \Delta E_{i,l,r-t} \quad (4.3)$$

Afin de faciliter l'évaluation du rendu de couleur de la source, une simplification supplémentaire fut introduite par la CIE: l'indice de rendu des couleurs global R_a qui est la moyenne arithmétique des huit premiers indices de rendu des couleurs spéciaux (Schanda, 2007).

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (4.4)$$

Du point de vue rendu des couleurs, une bonne source lumineuse (Bouaraba, 2012) est une source ayant un CRI supérieur à 90. Le tableau 4.3 donne une appréciation du rendu des couleurs en fonction de la valeur du CRI.

Tableau 4.3 Appréciation du rendu des couleurs
en fonction de la valeur du CRI
Tiré de Bouaraba (2012)

| CRI | Qualificatif d'appréciation |
|------------|------------------------------------|
| 90 - 100 | Excellent rendu des couleurs |
| 80 - 90 | Bon rendu des couleurs |
| 70 - 80 | Rendu des couleurs moyen |
| 50 - 70 | Mauvais rendu des couleurs |
| < 50 | Très mauvais rendu des couleurs |

La méthode de calcul du CRI comme simple moyenne arithmétique des huit premiers indices du rendu des couleurs spéciaux réduit l'information que ce paramètre contient du point de vue rendu de couleur. Lorsque deux sources ont le même R_a , cela ne signifie pas qu'un échantillon de couleur test particulier illuminé par chacune des deux sources donne des couleurs apparentes identiques. La comparaison des R_i s va fournir une meilleure idée sur la

similarité des deux sources, même si dans ce cas aussi, des valeurs de R_i s égales ne signifient pas que dans une scène complexe, la couleur apparaîtra identique sous illumination de l'une ou de l'autre source. Avec l'avènement des lampes fluorescentes à trois-bandes caractérisées par des efficacités et des CRIs assez élevées, les difficultés du CRI à décrire le rendu de couleur visuel devenaient de plus en plus importants (Schanda, 1998). L'avènement des LEDs blanches a accentué les inquiétudes sur le niveau de performance du CRI.

Limites de l'indice de rendu de couleur

L'indice de rendu de couleur présente un certain nombre de limitations particulièrement liées aux méthodes utilisées par la CIE pour le déterminer, surtout lorsqu'il est utilisé pour caractériser des DELs ou comme indicateur de qualité de couleur (NIST, 2006) pour diverses raisons:

- Le système de coordonnées CIE $U^*V^*W^*$ utilisé pour le calcul des différences de couleurs est non-uniforme, dépassé et son utilisation n'est plus recommandée. Actuellement, la CIE recommande les systèmes de coordonnées CIE $L^*a^*b^*$ 1976 (CIELAB) et CIE $L^*u^*v^*$ 1976 (CIELUV) pour le calcul des différences de couleurs (Baniya, 2012);
- La méthode de calcul de la CIE spécifie que la TCP de la source de référence doit être la même que celle de la source test, ce qui suppose une parfaite adaptation chromatique entre les chromaticités des deux sources. Cependant, cette hypothèse n'est pas valable aux valeurs extrêmes de TCP. Par exemple, à 2000 K (rouge vif) le radiateur de Planck a un $R_a = 100$, de même que le spectre de la lumière du jour à une TCP de 20.000 K (bleu vif) alors aucun d'entre elles ne rend correctement la couleur;
- Le rendu des couleurs des objets de couleurs saturées peut être très médiocre même si la valeur du CRI est bonne. De plus, l'optimisation des spectres des sources sur la base du CRI peut rendre les valeurs de ce dernier très élevées alors que le rendu de couleur correspondant reste faible. Ce problème est dû au faible nombre d'échantillons utilisé dans le calcul du CRI et à la très faible saturation chromatique de ces échantillons;

- Les huit indices spéciaux de rendu de couleur sont combinés par simple moyenne arithmétique pour obtenir l'indice global de rendu de couleur. Ceci permet à une source d'avoir un CRI élevé, même si elle rend une ou deux couleurs de manière très médiocre, Cette situation est d'autant plus fréquente aux sources avec des SPDs ayant des pics très rapprochés. Certaines sources au sodium à faible pression présentent des CRIs négatifs, ce qui rend ces derniers très difficile à interpréter (Davis and al., 2004; NIST, 2006);
- Selon la conclusion du rapport technique 177:2007, "*Color Rendering of White LED Light Sources*" de la CIE, le CRI n'est généralement pas applicable pour évaluer le rendu de couleurs de sources hybrides à base d'une association de DELs lorsque celle-ci contient une DEL blanche (CIE, 2007);
- Les simulateurs solaires sont de la famille des sources blanches. Une limite supplémentaire du CRI dans l'évaluation des performances d'un simulateur solaire est qu'il ne permet d'évaluer que la partie visible du spectre.

Sur la base de ces limitations, il est admis que l'accent absolu sur la fidélité des couleurs du CRI est erroné et une mesure plus générale de la qualité de la couleur doit être considérée. Plusieurs autres méthodes d'évaluation de la performance des sources en rendu des couleurs ont été développées pour apporter des solutions aux limitations du CRI. Un bon nombre de ces méthodes sont développés en détails par Rupak Raj Baniya dans son mémoire de Mastère sur le sujet «*Study of various metrics evaluating color quality of light sources*».

B. Indice de Métamerisme (MI pour *Metamerism Index* en anglais)

La méthode CIE N° 51 présentée dans son Rapport Technique N° 13.3 permet d'évaluer de manière quantitative la finesse de l'approximation de l'illuminant normalisé D_{65} , et des illuminants recommandés D_{55} et D_{75} de la CIE par des simulateurs solaires (Schanda, 1998). Cette technique repose sur le calcul des coordonnées de chromaticité du simulateur solaire à partir de sa SPD relative déterminée dans le domaine spectral 300 - 700 nm. Ces coordonnées

doivent avoir certaines valeurs permises, qui sont spécifiées en utilisant le système de coordonnées uniforme CIE (u' , v') 1976. Cette méthode de caractérisation impose que le point représentant le simulateur solaire dans le diagramme de chromaticité CIE (u' , v') 1976 soit dans un cercle de rayon de 0.015 centré à l'illuminant à représenter (Lam and Xin, 2002). Après la vérification des conditions de validité, la méthode consiste à calculer les Indices de Métamérisme Spéciaux du Visible (entre 400 - 700 nm), noté MI_{vis} et du domaine UV, noté MI_{uv} (entre 300 - 400 nm) qui découlent de la différence des SPDs des illuminants à celles des simulateurs leurs correspondant suivant les équations 4.5 et 4.6 .

$$MI_{vis} = \sum_{i=1}^5 \frac{\Delta E_i}{5} \quad (4.5)$$

$$MI_{uv} = \sum_{j=1}^3 \frac{\Delta E_j}{3} \quad (4.6)$$

Le calcul de MI_{vis} implique cinq paires de métamères, chacun parfaitement adapté aux illuminants de la CIE. Lorsqu'un simulateur solaire est utilisé, la différence de couleur moyenne sera supérieure à 0 à cause de la différence de sa SPD à celle de l'illuminant de la CIE. Cette valeur moyenne de la différence de couleur donne une indication sur la qualité du simulateur solaire dans le spectre visible.

Pour le calcul de MI_{uv} , trois paires métamères virtuels sont utilisés dont chacun est parfaitement adapté aux illuminants standards de la CIE dans la partie UV. De façon similaire au calcul MI_{vis} , la valeur moyenne des différences de couleur de ces trois paires est une indication sur la conformité du simulateur solaire à l'illuminant de la CIE pris comme référence dans la partie UV du spectre. L'équation CIELAB ou CIELUV pour le calcul de la différence de couleurs peut être utilisée pour le calcul des différences de couleurs entre les paires de métamères virtuels dans chaque cas.

4.4.1.2 Méthode spectrale: Distribution de l'irradiance spectrale

La caractérisation d'un simulateur solaire du point de vue spectral pour des applications photovoltaïques repose sur les trois paramètres essentiels déjà abordés à la section 4.3 que sont: le "*spectral match*", la non-uniformité spatiale et l'instabilité temporelle de l'irradiance spectrale. Ces paramètres sont évalués sur la base des spécifications établies dans les normes d'ASTM, d'IEC et de JIS. Aussi, le rendement d'une cellule solaire est d'autant meilleurs que l'énergie qu'elle absorbe est proche de l'énergie de la bande interdite de son semi-conducteur.

4.4.2 Classification des simulateurs solaires

Les techniques de caractérisation abordées à la section 4.4.1 ont permis de répartir les simulateurs solaires en classes selon leur performance. Sur la base des indices de métamerisme, la méthode N° 51 de la CIE a été utilisée pour établir une échelle de notation pour catégoriser la qualité d'un simulateur solaire (Lam and Xin, 2002). Le tableau 4.4 donne les différentes catégories de simulateurs solaires établies par cette méthode de caractérisation, la catégorie A correspond au meilleur simulateur solaire par contre la catégorie E correspond au pire. Avec cette méthode, les simulateurs solaires ayant des MI_{vis} de catégorie B ou plus et des MI_{uv} de catégorie C ou plus sont recommandés dans la comparaison visuelle des couleurs et dans de nombreuses autres applications (Schanda, 1998).

Tableau 4.4 Catégorisation des sources sur la base de l'indice de métamerisme
Tiré de Schanda (1998)

| Catégorie | MI (CIELAB) | MI (CIELUV) |
|-----------|-------------------|--------------------|
| A | $< 0,25$ | $< 0,32$ |
| B | $0,25 < MI < 0,5$ | $0,32 < MI < 0,65$ |
| C | $0,5 < MI < 1,0$ | $0,65 < MI < 1,3$ |
| D | $1 < MI < 2,0$ | $1,3 < MI < 2.6$ |
| E | $MI > 2,0$ | $MI > 2.6$ |

Du point de spectral, un simulateur solaire est défini selon le niveau de conformité de son irradiance spectrale à l'irradiance spectrale de référence. Cette méthode permet d'associer à

chacun des critères de performance "*spectral match*", non-uniformité spatiale et instabilité temporelle de l'irradiance trois classes; **Classe A**, **Classe B** et **Classe C**, traduisant, dans un ordre décroissant, le niveau de performance du simulateur solaire par rapport au critère considéré. Par exemple un simulateur de **Classe ABA** est de Classe A en "*spectral match*" de l'irradiance, Classe B en non-uniformité spatiale de l'irradiance et de Classe A en instabilité temporelle de l'irradiance. Un simulateur solaire de **Classe A** équivaut à un simulateur de **Classe AAA** (Applied Optix, 2014). Le tableau 4.5 donne les différentes classes associées à un simulateur solaire selon les normes établies par l'ASTM, l'IEC et le JIS.

Tableau 4.5 International standards for solar simulation performance
Tiré de Applied Optix (2014)

| Performance Parameters | Standard Organisation | | |
|-----------------------------------|-----------------------|--------------|--------------|
| | ASTM | IEC | JIS |
| Spectral Match | | | |
| Class A | 0.75 - 1.25 | 0.75 - 1.25 | 0.75 - 1.25 |
| Class B | 0.6 0 - 1.40 | 0.6 0 - 1.40 | 0.6 0 - 1.40 |
| Class C | 0.4 0 - 2.00 | 0.4 0 - 2.00 | 0.4 0 - 2.00 |
| Irradiation Non-Uniformity | | | |
| Class A | $\leq 3\%$ | $\leq 2\%$ | $\leq 2\%$ |
| Class B | $\leq 5\%$ | $\leq 5\%$ | $\leq 3\%$ |
| Class C | $\leq 10\%$ | $\leq 10\%$ | $\leq 10\%$ |
| Temporal Instability | | | |
| Class A | $\leq 2\%$ | $\leq 2\%$ | $\leq 1\%$ |
| Class B | $\leq 5\%$ | $\leq 5\%$ | $\leq 3\%$ |
| Class C | $\leq 10\%$ | $\leq 10\%$ | $\leq 10\%$ |

La performance d'un simulateur solaire peut dépendre d'autres paramètres tels que la sensibilité du détecteur; le choix d'un matériau de référence pour déterminer l'uniformité spatiale de l'irradiance spectrale est essentiel et ce matériau doit avoir une réponse spectrale appropriée par rapport au simulateur. Les informations sur les dimensions de la zone de

surface test que peut couvrir le simulateur doivent être données par le fabricant pour aider au bon usage de celui-ci. Une cartographie de l'uniformité spatiale de l'irradiance spectrale doit être associée au simulateur pour assister l'utilisateur dans ses opérations et définir clairement les zones de surface test qui devront être vues par le simulateur sous des classifications différentes. De plus, la classe d'un simulateur solaire standard ne fournit pas des informations sur les erreurs de mesures électriques lors de l'évaluation des performances d'un système photovoltaïque. De telles erreurs dépendent des instruments et des procédures utilisés.

CHAPITRE 5

MATERIEL ET METHODES

5.1 Introduction

La réalisation d'une source blanche hybride par une association de DELs nécessite de bien comprendre ces dernières. Les DELs sont des composants électroniques qui ont la capacité d'émettre de la lumière lorsqu'elles sont traversées par un courant électrique. Avec les avancées en sciences des matériaux notées ces dernières années, les DELs s'imposent de plus en plus dans de nombreuses applications telles que la signalisation, l'affichage, l'éclairage, etc., tout en offrant des voies prometteuses dans la réalisation de sources lumineuses plus complexes. Dans les premières sections de ce chapitre sont présentées quelques propriétés des DELs essentielles dans la caractérisation de notre simulateur solaire.

5.1.1 Structure d'une DEL à semi-conducteurs

Une DEL est constitué principalement d'une puce à semi-conducteurs dopée de manière à créer une jonction p-n afin de ne permettre la circulation du courant que dans un seul sens. Le côté n (ou cathode) contient un excès d'électrons et le côté p (ou anode) contient un excès de trous. Un courant électrique peut circuler de l'anode vers la cathode. Pour des raisons technologiques, les semi-conducteurs à bande interdite directe avec des énergies correspondant à des longueurs d'onde allant du proche IR au proche UV conviennent mieux pour la réalisation des DELs Mottier (2008). La figure 5.1 montre la structure énergétique d'un semi-conducteur à bande interdite directe dans l'espace des phases. La longueur d'onde du rayonnement lumineux émis par la DEL dépend des états énergétiques des électrons et trous qui lui ont données naissance.

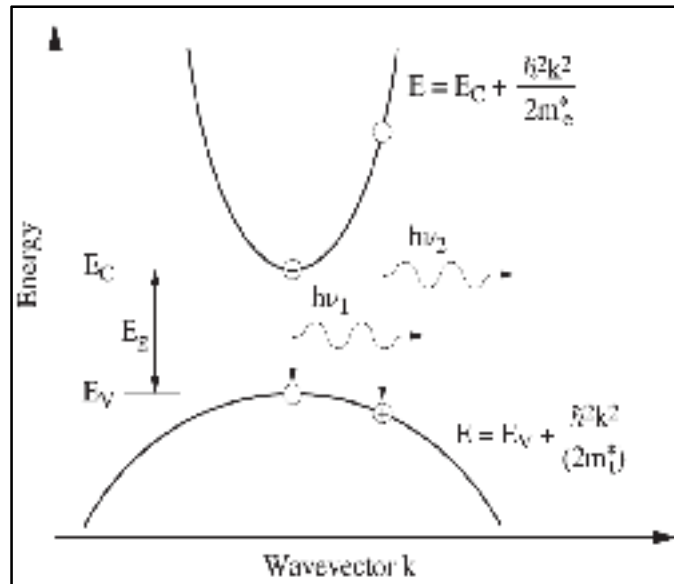


Figure 5.1 Structure énergétique d'un semi-conducteur à bande interdite directe dans l'espace des phases
Tirée de Mottier (2008)

5.1.2 Mouvement des charges et génération de la lumière

La création de la jonction p-n entraîne un déséquilibre de concentration des charges de part et d'autre de celle-ci. Ce déséquilibre provoque un libre déplacement des électrons de la cathode vers l'anode et des trous dans le sens opposé jusqu'au rétablissement de l'équilibre qui se traduit par la création d'une zone de déplétion. La figure 5.2 illustre de manière simplifiée le mouvement des charges à travers une jonction p-n dans une DEL à semi-conducteurs. En appliquant une tension positive suffisante sur l'anode de la DEL, les électrons reprennent leur déplacement de la cathode vers l'anode et les trous de l'anode vers la cathode. Lorsqu'un électron rencontre un trou dans la zone de déplétion, les deux se recombinent en libérant de l'énergie sous forme d'un photon lumineux émis par la DEL. Plus un semi-conducteur est dopé, plus le taux de recombinaison est élevé dû au faible temps de vie des porteurs de charges minoritaires, plus l'intensité de la lumière émise est importante.

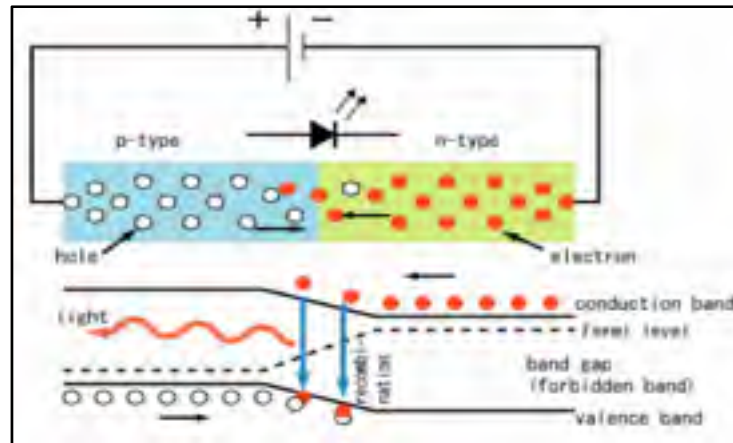


Figure 5.2 Diagramme simplifié d'une jonction p-n d'une diode à semi-conducteurs montrant le mouvement des électrons et des trous lorsqu'une tension positive est appliquée
Tirée de Velay (2011)

5.2 Propriétés photométriques des DELs

Quelques grandeurs photométriques caractérisant de manière générale les sources lumineuses sont déjà énoncées au chapitre 1. Nous ne les abordons de nouveau dans cette section que pour donner leurs ordres de grandeur dans le cas spécifique des DELs.

5.2.1 Intensité lumineuse des DELs

Dans le cas d'une DEL ayant un profil d'émission spatial Lambertien, l'intensité lumineuse mesurée dans la direction normale à la surface émettrice est donnée par l'équation 5.1.

$$I_v = \frac{\phi_{\text{détecteur}}}{\gamma} \left(\frac{r^2 + D^2}{\pi r^2} \right) \quad (\text{système SI}) \quad (5.1)$$

Avec

$\phi_{\text{détecteur}}$: puissance totale mesurée au niveau du détecteur en watts

r : rayon en mètres de la surface réceptrice du détecteur;

D : distance en mètres entre la source et le détecteur;

γ : facteur de perte (rapport du nombre de photons mesuré par le détecteur sur le nombre de photons émis par la source).

Des DELs blanches ayant une intensité lumineuse de 30 Cd dans un cône de rayonnement de demi-angle au sommet de 15° sont commercialisées par Nichia (Lumitronix, 2013). Pour une luminosité donnée, l'intensité lumineuse est inversement proportionnelle au demi-angle au sommet du cône de rayonnement d'une DEL.

5.2.2 Luminosité des DELs

5.2.3 Flux lumineux des DELs

La notion du flux lumineux a déjà été abordée à la section 1.2 du chapitre 1. La figure 5.3 donne un exemple de la dépendance du flux lumineux et de l'efficacité externe d'une DEL blanche à rendement super-élevé en fonction du courant d'alimentation.

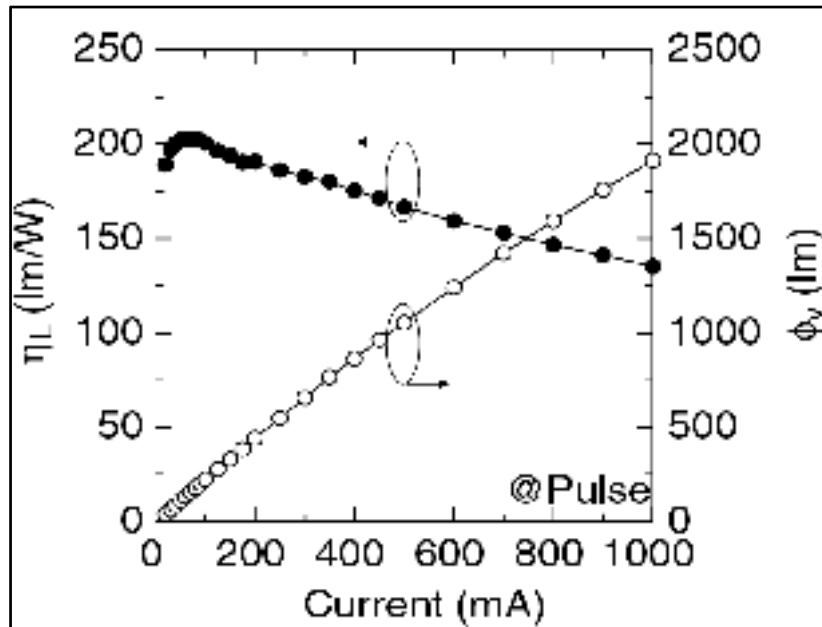


Figure 5.3 Dépendance du flux lumineux ϕ_{lum} et du rendement lumineux externe η_L d'une DEL blanche ultra puissante entre 20 et 1000 mA. ϕ_v , V_f , η_L , T_{cp} et (x, y) à 350 mA avaient pour valeurs respectives 203 lm, 3.18 V, 183 lm W⁻¹ 4700 K et (0.36, 0.39)
Tirée de Narukawa et al. (2010)

5.2.4 Efficacité lumineuse de radiation (LER) des DELs

Un des défis majeurs de la technologie DELs réside au niveau de l'efficacité lumineuse. En 2009, des chercheurs américains s'étaient déjà officiellement fixés comme objectif de réaliser, avant 2011, des DELs blanches ayant des LERs de 200 lm.W⁻¹ et des durées de vie de plus de cinq ans pour un prix de moins \$1.00 par diode. Des simulations effectuées par Yoshi Ohno et Wendy Davis du National Institute of Standards and Technology (NIST) ont montré que des DELs présentant des spectres d'émission avec de bons CRIs et des LERs comprises entre 350 et 460 lm.W⁻¹ peuvent être obtenues (US-DOE, 2013). Le tableau 5.1 montre les valeurs actuelles de LERs ainsi que les projections en termes de performance et prix de quelques types de DELs disponibles au sein du Department Of Energy des États-Unis (DOE).

Tableau 5.1 Sommaire des projections sur les performances et le prix des DELs blanches froides et blanches chaudes
Tiré d'US-DOE (2013)

| Caractéristiques des DELs | 2012 | 2013 | 2015 | 2020 | Objectif |
|--|------|------|------|------|----------|
| Efficacité du blanc-froid (lm.W ⁻¹) ⁴ | 150 | 164 | 190 | 235 | 266 |
| Prix du blanc froid (\$/klm ⁻¹) | 6 | 4 | 2 | 0.7 | 0.5 |
| Efficacité du blanc-chaud (lm.W ⁻¹) ⁵ | 113 | 129 | 162 | 224 | 266 |
| Prix du blanc-chaud (\$/klm ⁻¹) | 7.9 | 5.1 | 2.3 | 0.7 | 0.5 |

^{4,5} Les projections sur les dispositifs à DELs blanc-froid considèrent des TCP de 4746 à 7040 K et des CRI > 70, tandis que les projections sur les dispositifs à DELs blanc-chaud considèrent des TCP de 2580 à 3710 K et des CRI > 80. Toutes les projections d'efficacité considèrent que les dispositifs sont mesurés à une température de 25 °C avec une densité de courant d'alimentation de 35 A/cm².

5.2.5 Couleur des DELs

La couleur d'une DEL est caractérisée par l'énergie de la bande interdite des matériaux semi-conducteurs qui constituent sa jonction p-n. La figure 5.4 montre l'énergie de la bande interdite et la longueur d'onde d'émission pour quelques semi-conducteurs élémentaires et systèmes binaires c'est-à-dire des semi-conducteurs formés d'une association de deux composants.

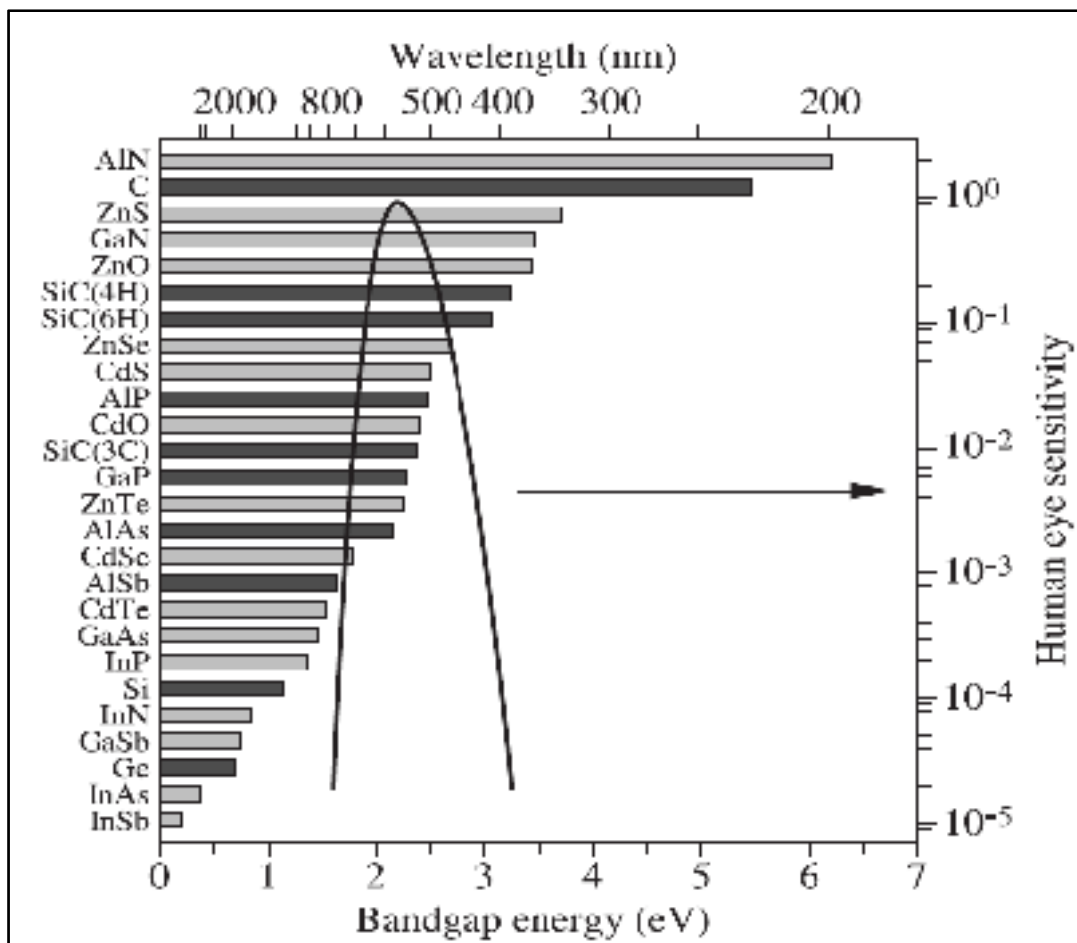


Figure 5.4 Énergie de la bande interdite et longueurs d'onde d'émission pour quelques semi-conducteurs élémentaires et systèmes binaires. Les barres grises correspondent aux semi-conducteurs à bande interdite directe et celles sombres aux semi-conducteurs à bande interdite indirecte. La courbe continue représente la sensibilité de l'œil humain, $V(\lambda)$ exprimée ici en fonction de l'énergie de la bande interdite

Tirée de Mottier (2008)

En se référant à la figure 5.1, lorsqu'un électron issu du niveau minimum de bande conduction se recombine avec un trou du niveau maximum de la bande de valence ($k = 0$), celui-ci libère un photon de longueur d'onde λ_1 , comme l'illustre l'équation 5.2.

$$h \frac{c}{\lambda_1} = E_g = E_C - E_V \quad (5.2)$$

Avec

h = constante de Planck;

E_g : énergie de la bande interdite;

c : célérité de la lumière dans le vide.

La longueur d'onde λ_1 correspond exactement à l'énergie de la bande interdite E_g du semi-conducteur. Il est possible que les transitions se fassent avec des valeurs de $k \neq 0$, le photon issu de la recombinaison aura une longueur d'onde λ_2 légèrement différente de λ_1 . Par conséquent, la DEL produira une "*raie*" avec une longueur d'onde centrale (ou dominante) λ_d et une largeur à mi-hauteur $\Delta\lambda_{FWHM}$. La largeur de bande à mi-hauteur $\Delta\lambda_{FWHM}$ dépend d'une part de la densité électronique dans l'intervalle d'énergie $E \pm \Delta E$ considéré, d'autre part de la densité des états énergétiques du semi-conducteur Mottier (2008). La valeur de $\Delta\lambda_{FWHM}$ est déterminée aisément par l'équation 5.3.

$$\Delta E_{FWHM} = h E_C v_{FWHM} = 1.8 k_B T \quad (5.3)$$

L'intensité maximale de la DEL à la longueur d'onde $\lambda_{max} \neq \lambda_1$ est donnée par l'équation 5.4.

$$\lambda_{max} = \frac{c}{\frac{E_g}{h} + \frac{k_B T}{2h}} \quad (5.4)$$

Avec

T : température de la jonction;

k_B : constante de Boltzmann.

5.3 Contraintes de température et stabilité des DELs

Une DEL est généralement considérée comme un dispositif "*froid*" en termes de température car son rayonnement ne contient pas de radiation infrarouge contrairement aux lampes incandescentes. Aussi, le mécanisme de génération de lumière dans une DEL diffère de celui l'excitation thermique d'une substance comme les filaments de tungstène dans les lampes à incandescence. Cependant, leur jonction est une source de chaleur dissipée par convection et par conduction. Une DEL fonctionnant dans un environnement à température ambiante normale (entre 20 °C et 25 °C) et aux courants recommandés par le fabricant peut avoir des températures de jonction très élevées de l'ordre de 60 °C à 80 °C. La figure 5.5 montre la dépendance des intensités lumineuses relatives de trois DELs (rouge, bleue et blanche) en fonction de la température de leur jonction. Les données expérimentales sont normalisées à 100 pour une température ambiante de 25 °C.

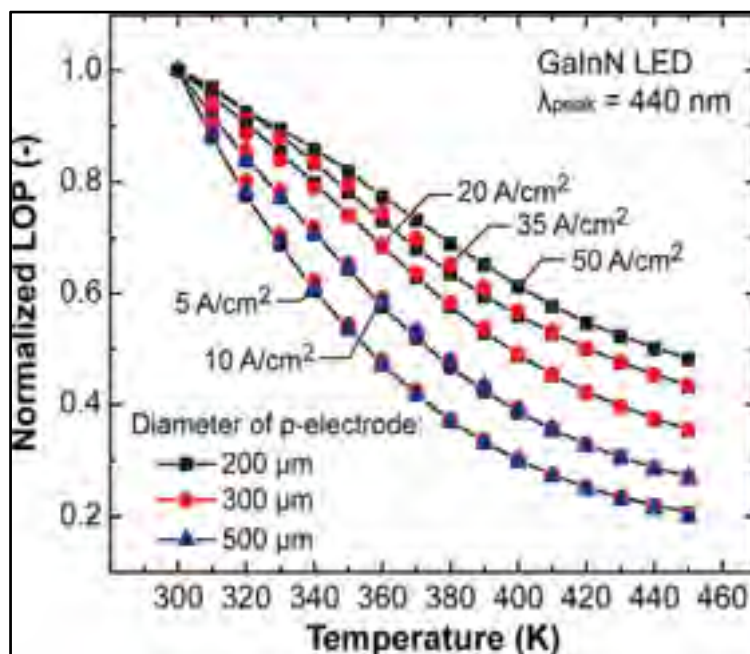


Figure 5.5 Puissances de sortie normalisées en fonction de la température de la jonction mesurée à des densités de courant variant de 5 à 50 A.cm⁻² pour des puces DELs de différentes dimensions

Tirée de Meyaard et al. (2012)

La température peut également affecter la stabilité d'une DEL. En se référant aux équations 4.3 et 4.4, on remarque que les valeurs de ΔE_{FWHM} et de λ_{max} dépendent de la température de fonctionnement de la DEL. La figure 5.6 montre l'influence de la température sur le profil spectral du rayonnement émis par une DEL. On note un décalage de la distribution spectrale relative d'énergie vers les plus grandes longueurs d'onde qui est estimé à 0.1 à 0.3 nm.°C (Mottier, 2008); ce qui peut être à l'origine d'une sévère dérivation de la couleur de la DEL lorsque la température de la jonction évolue.

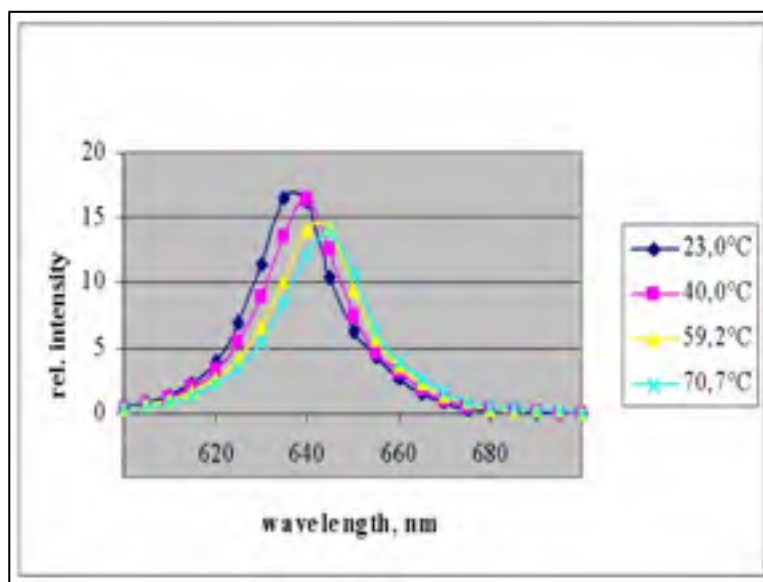


Figure 5.6 Une DEL produit une lumière sensiblement quasi-monochromatique mais son intensité et sa largeur spectrale dépendent fortement de la température de la jonction
Tirée de Schanda (2004)

Un autre paramètre qui peut être affecté par la température au sein des DELs est la durée de vie utile. La figure 5.7 illustre la dépendance de la durée de vie d'un lot de DELs testé en fonction de l'intensité du courant d'alimentation et de la température de jonction. La notation (B50, L70) en bas gauche de la figure signifie qu'après un temps de fonctionnement de 10.000 heures à une température de jonction de 100 °C, 50% des DELs du lot testé n'émettent plus que 70% de leur flux lumineux initial (Mottier, 2008). On peut remarquer

également que, sans une gestion adéquate de la température, un fonctionnement prolongé à température élevée peut accélérer la dégradation des composants de la jonction et occasionner irréversiblement une diminution plus rapide de l'intensité émise comparée à celle émise par une DEL fonctionnant à plus basse température.

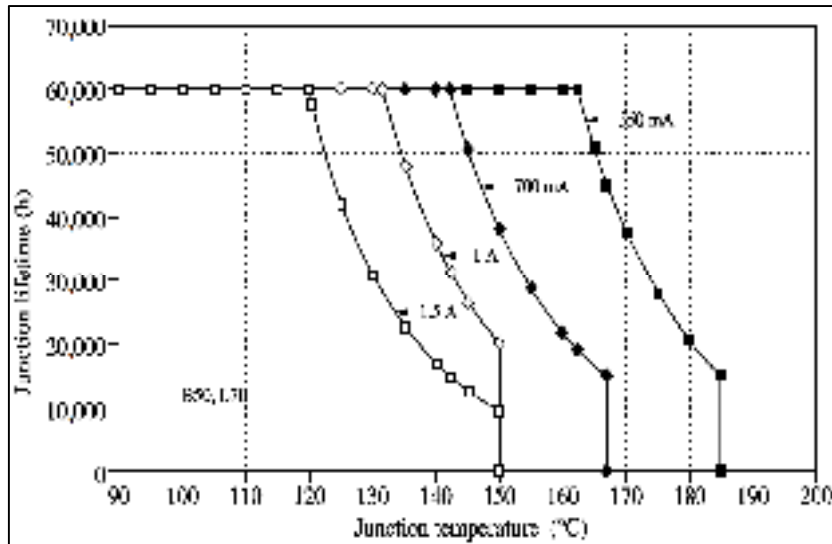


Figure 5.7 Dépendance de la durée de vie d'une DEL en fonction du courant d'alimentation et de la température de la jonction
Tirée de Mottier (2008)

5.4 Dispositif expérimental

Nous avons sélectionné un lot de dix-sept DELs commerciales à semi-conducteur, pour la réalisation expérimentale d'un simulateur solaire D₆₅. Les deux autres parties du dispositifs expérimental sont : un bloc support du circuit d'alimentation électrique des DELs et un dispositif d'acquisition des données spectrales et colorimétriques.

5.4.1 Lot de (DELs)

Ces différentes DELs de package T-1 $\frac{3}{4}$ (5 mm) sont choisies pour des raisons de simplicité de la conception du circuit d'alimentation et de coûts. Le tableau 5.2 résume quelques caractéristiques de ces différentes composantes. Ce type de DELs est produit en

masse et peut donc présenter des caractéristiques fluctuantes d'une DEL à une autre pour une couleur donnée.

Tableau 5.2 Les différentes composantes DELs du simulateur solaire D₆₅

| N° | λ_d (nm) | P (mW) @ 20mA | Code | θ (°) pour 50% rayon. ^{mt} | Fabriquant |
|----|------------------|------------------------|--------------------|---|----------------|
| 1 | 365 | 2,4 - 6 | XSL-365-5E | 15 | R. L. GmbH |
| 2 | 400 | 8,1-11,5 | VL400-5-15 | 15 | R. L. GmbH |
| 3 | 425 | 06 - 08 | LED425-6-30 | 15 | R. L. GmbH |
| 4 | 440 | 05 - 06 | VL-440-6-30 | 15 | R. L. GmbH |
| 5 | 505 | n/sp | B5-433-B505 | 15 | R. L. GmbH |
| 6 | 525 | 07 - 10 | B5-433-B525 | 15 | R. L. GmbH |
| 7 | 535 | n/sp | C503B-GCS-CY0C0791 | 30 | CREE |
| 8 | 589 | n/sp | OVLFY3C7 | 20 | TT Electronics |
| 9 | 627.5 | n/sp | LEDRGBE | 30 | Thorlabs |
| 10 | 640 | n/sp | L-53SRC-E | 30 | Kingbright |
| 11 | 660 | n/sp | B5B-436-30 | 08 | R. L. GmbH |
| 12 | 680 | 25 mW.sr ⁻¹ | LED680-02AU | 07 | R. L. GmbH |
| 13 | 720 | 07 | ELD-720-524 | 20 | R. L. GmbH |
| 14 | 760 | 10 | LED760/940-04A | 07 | R. L. GmbH |
| 15 | 780 | 18 | LED780-01AU | 20 | R. L. GmbH |
| 16 | 820 | 18 | LED820-01AU | 10 | R. L. GmbH |
| 17 | 465 | n/sp | W54L5111P | 15 | R. L. GmbH |

La liste des fiches techniques des différentes DELs constituant le simulateur solaire D₆₅ à quatorze DELs réalisé, exceptée celle de la DEL425-6-30 disponible que sur demande auprès du fournisseur, sont présentées en annexe VII. Certaines fiches montrent une éventuelle

variation de la longueur d'onde centrale λ_d des DELs d'une couleur de $\Delta\lambda = \pm 5 \text{ nm}$ de part et d'autre de λ_d . De plus, les DELs de couleur se caractérisent par des largeurs à mi-hauteur ("*Full Width Half Maximum*", *FWHM*) assez étroites, de l'ordre de 15 à 25 nm, ce qui imposerait un grand nombre de DELs pour atteindre le match spectral avec la SPD de l'illuminant normalisé D_{65} . La majeure partie des DELs nous est fournie par le fabricant Roithner Lasertechnik GmbH (R. L. GmbH), le recours à d'autres fournisseurs s'explique par le fait que les DELs reçues de ces derniers n'étaient pas disponibles chez R. L. GmbH.

5.4.2 Le circuit d'alimentation des DELs

Sur un support, nous avons réalisé un circuit électrique permettant d'alimenter toutes les composantes DELs par une seule source de tension continue fixée à 5 volts. La figure 5.8 montre le schéma du circuit constituée d'un bloc (a) permettant l'alimentation d'une mono-DEL et d'un autre bloc (b) pour l'alimentation d'une multi-DEL. Le circuit complet permet d'alimenter douze mono-DELs, une double DEL760/940-04A et une triple DEL RGBE soit un total de quatorze DELs. Dans le bloc d'alimentation des mono-DELs, les résistances $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ et $R_2 = 50 \text{ k}\Omega$ constituent un diviseur de tension fixe servant de référence à l'amplificateur MCP6272 qui assure le contrôle actif du courant qui traverse la mono-DEL via le transistor 2N3904. Ce dernier joue le rôle de valve de courant pour la mono-DEL. Dans chacun des deux blocs, une résistance $R_h = 10 \text{ k}\Omega$ variable permet d'ajuster le courant d'alimentation de la mono-DEL ou de la multi-DEL et les résistances $R_3 = 10 \Omega$ et $R_4 = 100 \Omega$ jouent le rôle de résistances de protection pour la mono-DEL et multi-DEL respectivement. Les résistances R_1 , R_2 , R_3 et R_4 sont déterminées de sorte que le circuit garantisse la protection des DELs contre les hausses brusques de courant lors des ajustements d'intensité pour optimiser les paramètres du simulateur D_{65} .

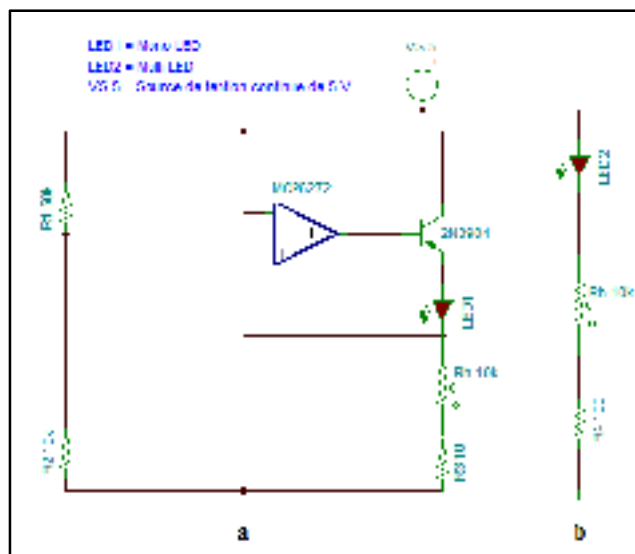


Figure 5.8 Circuit d'alimentation en courant
a. pour les mono-DELs, **b.** pour les multi-DELs

5.4.3 Le système d'acquisition des données : le logiciel SpectraSuite™

Le système d'acquisition de données est constitué d'une sphère intégratrice reliée à un spectromètre Jaz d'Ocean Optics Inc., d'une couverture spectrale allant de 350 à 1000 nm connecté par un câble à fibre optique QP400-1-UV-VIS de 400 μm de diamètre et de bande spectrale 300-1100 nm. Le spectromètre Jaz est connecté via un câble en cuivre d'environ 100 cm de long au port USB d'un ordinateur sur lequel est installé le logiciel SpectraSuite™. SpectraSuite™ est la dernière génération des logiciels exploités par Océan Optics. Un bouchon en plastique percé de 14 trous, conçu par Nelson Landry, a servi de support des DELs à l'entrée de la sphère intégratrice. Comme le montre la figure 5.9, ce support est conçu de façon à ce que les axes de faisceaux des différentes DELs constituant notre simulateur solaire convergent au centre du fond de la sphère intégratrice. Une source de lumière tungstène-halogène LS-1-CAL alimentée sous une tension de 110 V est utilisée pour la calibration du spectromètre. La figure 5.10 présente le montage expérimental de cette calibration.

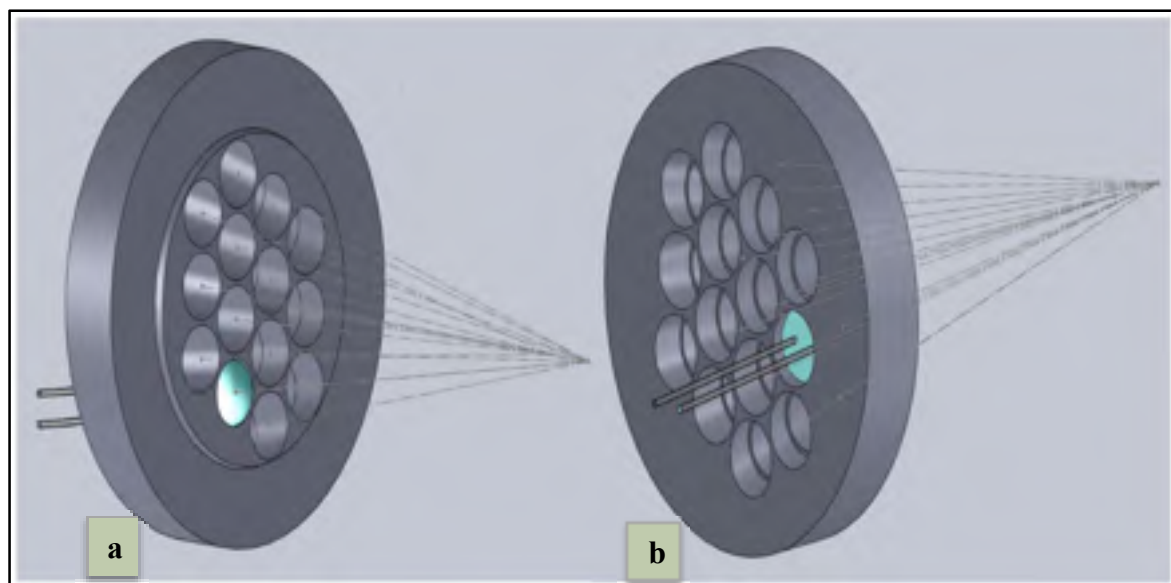


Figure 5.9 Bouchon support des DELs à l'entrée de la sphère intégratrice :
a. vue de face et **b.** vue de de profil

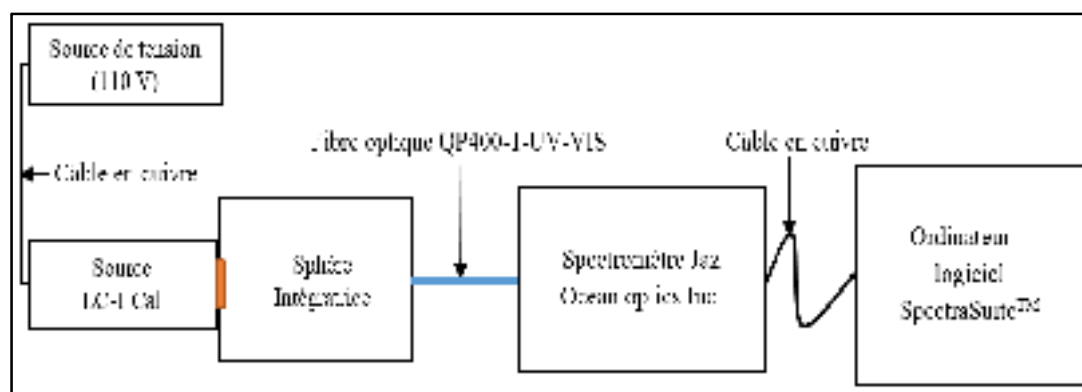


Figure 5.10 Montage expérimental de calibration du spectromètre Jaz

Le tableau 5.3 donne les caractéristiques de la source LS-1-CAL obtenues à partir de SpectraSuite™ en utilisant le spectromètre Jaz.

Tableau 5.3 Caractéristiques de la source LS-1-CAL

| Source LS-1-CAL | | | |
|-----------------|--------|--------|------|
| x | y | TCP °K | CRI |
| 0,4518 | 0,4062 | 2780 | 98,3 |

Le spectromètre Jaz, le câble à fibre optique QP400-1-UV-VIS, la source de calibration LS-1-CAL et le logiciel SpectraSuite™ sont tous conçus par Ocean Optics. La sphère intégratrice est produite par un autre fabricant.

SpectraSuite est un outil simple et puissant qui offre une interface permettant de fixer tous les paramètres d'acquisition des données colorimétriques et spectro-radiométriques. Les caractéristiques colorimétriques, photométriques ainsi que l'irradiance spectrale relative des sources ou des objets étudiés sont directement lues en temps réel à partir de SpectraSuite™. Un autre avantage de SpectraSuite est qu'il offre la possibilité de contrôler tous les paramètres du système et d'effectuer le suivi des références et des temps d'acquisition des différentes expériences.

5.5 Vérification de la validité de SpectraSuite™

Pour vérifier la validité des résultats obtenus via SpectraSuite dans le cadre de notre travail, nous nous sommes basés sur les deux considérations ci-dessous.

5.5.1 Certification de SpectraSuite™

La calibration de spectromètres d'Ocean Optics inc. avec SpectraSuite™ comme interface graphique est effectuée au sein de nombreux laboratoires: les laboratoires Dunedin et Winter Park en Floride, le laboratoire Ostfildern en Allemagne et le laboratoire Shanghai, PRC en Chine. Ocean Optics Inc. a obtenu la certification de la calibration de ses spectromètres, associés à SpectraSuite, par la source LS-1-CAL-INT au près du laboratoire Winter Park (Floride). Le numéro du certificat est le 12525 en date du 14 mai 2012; (voir l'annexe VI) ce qui pourrait servir comme preuve de validité de SpectraSuite.

5.5.2 Caractérisation d'un pointeur laser vert de longueur connue

Nous avons utilisé un pointeur laser vert émettant un faisceau monochromatique de longueur d'onde $\lambda_d = 532 \text{ nm}$. En caractérisant ce pointeur par Spectrasuite, on a pu remarqué qu'il

est représenté par le point de coordonnées de chromaticité $x = 0.225$ et $y = 0.780$ dans l'espace CIE (x, y) 1931. Ces coordonnées de chromaticité représentent une radiation monochromatique de longueur d'onde $\lambda = 532 \text{ nm}$ qui est bien celle de notre pointeur.

Ces deux considérations nous permettent de considérer SpectraSuite™ comme un outil fiable dans le cadre de notre projet.

5.6 Méthodologie

5.6.1 Approche expérimentale

Un simulateur solaire D_{65} destiné aux applications photovoltaïques est principalement caractérisé par le degré de conformité de son irradiance spectrale aux spectres de référence établis dans les standards ASTM, IEC ou JIS et par sa température de couleur. Une bonne approximation de ces paramètres par l'association de DELs nécessite la connaissance:

- du profil spectral de chacune de ces dernières en fonction de leur courant d'alimentation (voir annexe VII);
- du comportement des caractéristiques colorimétriques et spectrales des sources hybrides en fonction du nombre de DELs et de leurs intensités lumineuses.

Ces deux points essentiels permettent d'évaluer le poids de chacune des composantes DELs dans la composition du simulateur solaire D_{65} à réaliser.

5.6.2 Poids de chacune des composantes DELs

Le poids d'une DEL dans la composition du simulateur solaire D_{65} est d'autant plus important que la variation de son intensité lumineuse affecte de façon notable une ou plusieurs des principales caractéristiques du simulateur telles que la TCP, les valeurs de tristimuli X, Y Z (ou les coordonnées de chromaticité x, y) et la SPD. Le poids pour chaque DEL est évalué en effectuant plusieurs expériences test pour réaliser des sources blanches comportant trois, et diverses combinaisons de six, huit, dix et même douze DELs sans trop se

soucier de leur rapprochement avec l'illuminant normalisé D_{65} . Lors des ajustements des intensités lumineuses des DELs, on a pu noter la dépendance de chacun des paramètres colorimétriques de la source réalisée à l'intensité lumineuse de chaque DEL; l'intensité lumineuse d'une DEL pouvant éventuellement être nulle. Nous avons remarqué que seules les DELs de longueurs d'onde dominantes appartenant au domaine spectral 380 - 680 nm ont une influence majeure sur au moins une des caractéristiques TCP, valeurs de tristimuli X, Y Z (ou coordonnées de chromaticité x, y) des sources réalisées. Le tableau 5.4 regroupe les douze DELs identifiées avoir potentiellement une influence majeure sur les caractéristiques colorimétriques et spectrales du simulateur solaire D_{65} à réaliser.

Tableau 5.4 DELs composant le simulateur solaire D_{65} dont la variation de l'intensité lumineuse influe considérablement sur les caractéristiques colorimétriques

| N^o | couleur | λ_d (nm) | N^o | couleur | λ_d (nm) | N^o | couleur | λ_d (nm) |
|-------|----------|------------------|-------|------------|------------------|-------|---------|------------------|
| 1 | Mauve | 400 | 5 | Verte-Bleu | 505 | 9 | Rouge-1 | 627.5 |
| 2 | Violette | 425 | 6 | Verte-1 | 525 | 10 | Rouge-2 | 640 |
| 3 | Bleue | 440 | 7 | Verte-2 | 535 | 11 | Rouge-3 | 660 |
| 4 | Blanche | 460 | 8 | Jaune | 589 | 12 | Rouge-4 | 680 |

Les constats faits sur chaque DELs à l'issues de nos différentes expériences sont les suivants:

- 1. DEL VL400-5-15 ($\lambda_d = 400$ nm):** La variation son intensité lumineuse est proportionnelle à la valeur du stimulus Z. Les autres paramètres de la source ne sont pratiquement pas affectés.
- 2. DEL 425-6-30 ($\lambda_d = 425$ nm):** Une faible variation de son intensité lumineuse permet d'ajuster sensiblement les valeurs de x, y, z et de la TCP et plus finement la valeur de Z.
- 3. DEL VL-440-6-30 ($\lambda_d = 440$ nm):** Une variation de son intensité a également une forte influence sur les valeurs de x, y et z ainsi que sur la TCP. Sa SPD qui se superpose avec le pic celle de la DEL blanche fait en sorte que son utilisation n'est pas optimale.

4. **DEL W54L5111P ($\lambda_d = 460 \text{ nm}$)**: elle représente la composante essentielle de la source test. Elle contrôle fortement l'énergie en agissant simultanément et de façon globalement non proportionnée sur les valeurs de tristimuli X, Y et Z, de la TCP, du CRI, et des coordonnées de chromaticité x, y, et z. Une légère variation de son intensité entraîne une nette modification de la densité spectrale de l'irradiance de la source entre 410 nm et 700 nm. Son intensité lumineuse est proportionnelle aux valeurs de tristimuli X, Y et Z et de la TCP et inversement proportionnelle aux valeurs des coordonnées de chromaticités x et y. Sa longueur d'onde dominante à 465 nm lui permet de jouer en même temps le rôle d'une DEL bleue ce qui nous a permis d'épargner l'utilisation d'une DEL supplémentaire même si cet option peut rendre plus complexe l'optimisation des caractéristiques du simulateur solaire D₆₅.
5. **DEL B5-433-B505 ($\lambda_d = 505 \text{ nm}$)**: la variation de son intensité entraîne une forte variation des valeurs de la TCP, du CRI, du stimulus Y et des coordonnées de chromaticités x et y. Elle représente le principal moyen pour faire des ajustements très précis sur la valeur du stimulus X et a simultanément une légère influence sur les autres paramètres colorimétriques de la source. Son intensité est proportionnelle aux valeurs de tristimuli X, Y, Z, à la valeur de la coordonnée y et à la valeur TCP et inversement proportionnelle à la valeur de la coordonnée x.
6. **DEL B5-433-B525 ($\lambda_d = 525 \text{ nm}$)**: la variation de son intensité lumineuse modifie sensiblement les valeurs de y et du CRI et influe légèrement sur la TCP et permet d'ajuster finement la valeur du stimulus Y.
7. **DEL C503B-GCS-CY0C0791 ($\lambda_d = 535 \text{ nm}$)**: La variation de son intensité lumineuse présente les mêmes effets que ceux notés avec la variation de l'intensité lumineuse de la DEL B5-433-B525.
8. **DEL OVLFY3C7 ($\lambda_d = 589 \text{ nm}$)**: elle influe fortement sur les valeurs des stimuli X et Y, du CRI et de la TCP. La variation de son intensité a une incidence globale sur les caractéristiques de la source.

- 9. DEL RGB ($\lambda_d = 627.5 \text{ nm}$):** elle dicte principalement les valeurs de la TCP et du CRI.
- 10. DEL L-53SRC-E ($\lambda_d = 640 \text{ nm}$):** elle agit pratiquement sur les mêmes paramètres que la composante rouge de la *LED RGB* ($\lambda_d = 627.5 \text{ nm}$).
- 11. DEL B5B-436-30 ($\lambda_d = 660 \text{ nm}$):** Elle permet de contrôler efficacement la composante x et la CRI, influe légèrement sur la valeur du TCP sans occasionner des changements majeurs sur les valeurs des autres caractéristiques du simulateur solaire D_{65} .
- 12. DEL680-4-30 ($\lambda_d = 680 \text{ nm}$):** son intensité influe légèrement sur la composante x.

Les intensités lumineuses des DELs complémentaires, considérées comme de poids faibles, ne contribuent essentiellement qu'à la réalisation du match spectral. Les références de ces dernières DELs sont regroupées au tableau 5.5.

Tableau 5.5 DELs dont la variation de l'intensité lumineuse influe faiblement sur les caractéristiques colorimétriques du simulateur solaire D_{65}

| N° | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|
| Couleur | UV | Rouge | Rouge | Rouge | Rouge |
| $\lambda_d \text{ (nm)}$ | 365 | 720 | 760 | 780 | 820 |

Les caractéristiques de certaines de ces DELs sont données en détails à l'annexe VII. A partir de ces dix-sept DELs, nous essayerons de réaliser un simulateur solaire D_{65} qui devra respecter toutes les spécifications standards requises entre 350 nm et 850 nm pour la simulation et la caractérisation de cellules ou systèmes solaires photovoltaïques.

CHAPITRE 6

RÉALISATION D'UN SIMULATEUR SOLAIRE D_{65} A BASE DE DIODES ELECTROLUMINESCENTES

6.1 Méthodes de réalisation de sources blanches avec des DELs

Les DELs de couleur ne peuvent générer que des faisceaux quasi-monochromatiques dans le visible sur de très faibles largeurs spectrales ou des faisceaux dans l'UV qui ne peuvent pas être traités par le système visuel humain. Ces faisceaux doivent être convertis pour obtenir de la lumière blanche. Il existe trois méthodes principales pour réaliser une source émettant de la lumière blanche avec des DELs de couleur: la combinaison de luminaires de différentes couleurs pour générer de la lumière blanche, la conversion de longueur d'onde par utilisation d'un phosphore et l'utilisation de puces DELs émettant directement les différentes composantes spectrales de la lumière blanche (Liu and Luo, 2011).

6.1.1 Génération de lumière blanche par conversion du phosphore

Cette méthode de génération de lumière blanche utilise généralement la combinaison d'une DEL bleue avec un phosphore jaune ou la combinaison d'une DEL UV (ou violette) avec un phosphore RGB. En recouvrant une DEL bleue de phosphore jaune, une partie de la lumière bleue émise par la puce est convertie en lumière jaune et l'autre partie est directement transmise. Le mélange de la lumière bleue et de la lumière jaune donne une lumière blanche. La figure 6.1 illustre un principe d'obtention de la lumière blanche en utilisant cette technique.

En ajustant les proportions du mélange et la concentration du phosphore on peut obtenir de la lumière blanche à différentes TCP. Des fabricants tels que Nashia, CREE, Lumileds, etc. produisent en série des DELs blanches de forte puissance (5 à 7 W) avec une température de couleur de l'ordre 5500 K en utilisant une DEL bleue (InGaN) combinée avec du phosphore jaune (YAG-Ce). Dans le cas d'une DEL UV avec un phosphore RGB, la lumière UV émise

par la puce est convertie en lumières rouge, verte et bleue par le phosphore RGB. Ces dernières couleurs sont mélangées pour générer de la lumière blanche.

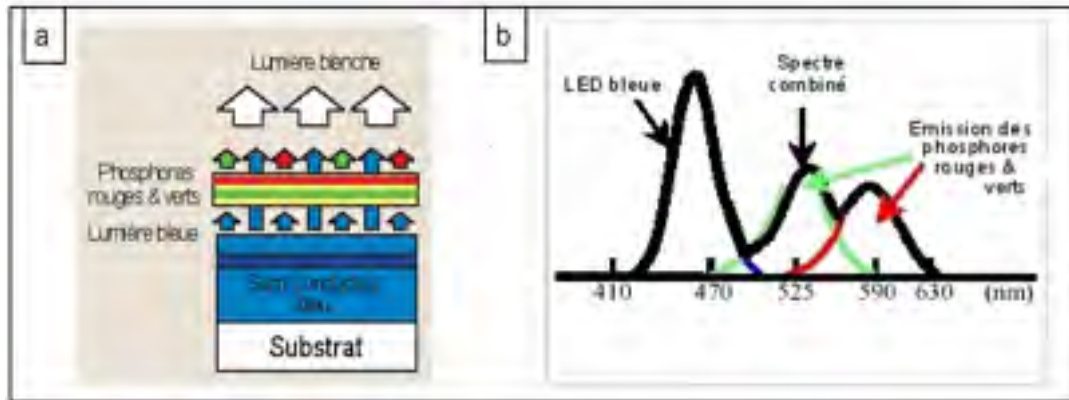


Figure 6.1 Génération de lumière blanche par conversion du phosphore
(Tiré de L. MASSOL)

6.1.2 Génération de lumière blanche par une DEL à puce de lumière blanche: méthode dite de Schubert ou de recyclage de photons

Une puce DEL de lumière blanche permet à une DEL d'avoir la possibilité d'émettre directement de la lumière blanche. Ce qui impose que cette dernière puisse générer au moins deux lumières différentes qui seront combinées pour donner de la lumière blanche. Cette technique est appelée méthode de Schubert ou de recyclage de photons. La figure 6.2 illustre le principe de génération de lumière blanche selon cette technologie.

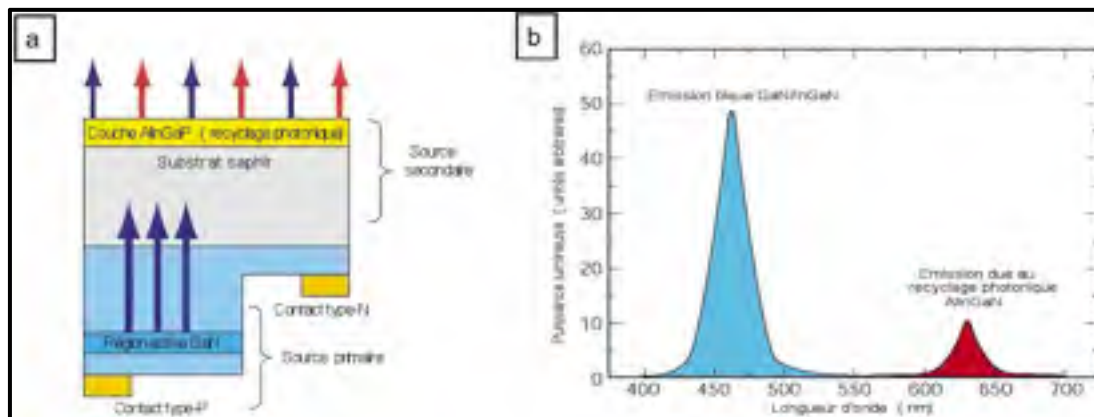


Figure 6.2 Génération de lumière blanche par une DEL à puce de lumière blanche
(Tiré de L. MASSOL)

Par cette méthode, Chien-Hao Huang et al. (Huang and Chen, 2011) ont réalisé une puce DEL émettant de lumière bleue et de la lumière jaune qu'ils ont combinée pour obtenir une lumière blanche.

6.1.3 Génération de lumière blanche par combinaison de différentes couleurs

Nous avons montré dans les sections précédentes qu'il est possible de générer de la lumière blanche à partir de trois primaires monochromatiques, le rouge, le vert et le bleu. R. Muller-Mach et d'autres chercheurs ont étudié deux types de DELs trichromatiques générant de la lumière blanche: 460-530-639 (nm) avec un bon rendement lumineux mais un faible CRI et 450-550-610 (nm) avec un CRI élevé mais très sensible à la température et non stable. La figure 6.3 donne un exemple du principe d'une lumière blanche en associant trois DELs rouge, verte et bleue

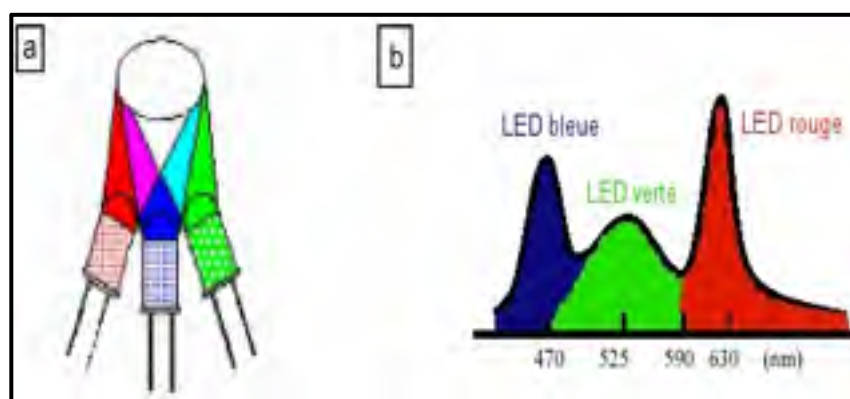


Figure 6.3 Génération de lumière blanche par une combinaison de DELs de couleurs différentes
(Tiré de L. MASSOL)

Le point représentant la source résultante d'un mélange de plusieurs sources monochromatiques se situe à l'intérieur du polygone formé par les points représentant ses différentes composantes dans le diagramme de chromaticité CIE (x, y) 1931, En ajustant les

intensités, on peut produire de la lumière blanche dont la TCP dépend de la proportion de chacune des composantes. Cette méthode est d'une grande simplicité pour la génération de la lumière blanche mais le TCP, l'efficacité lumineuse et la stabilité chromatique doivent être surveillés. Cette dernière méthode est celle qui a été utilisée dans ce travail pour la réalisation du simulateur solaire D_{65} .

6.2 Réalisation du simulateur solaire D_{65}

Il est possible d'obtenir la chromaticité de la lumière aux différentes phases de la lumière du jour et d'optimiser le rendu de couleur final en assemblant un grand nombre de DELs de couleurs différentes. C'est le cas de l'assemblage rouge, ambre, vert, bleu ou de l'assemblage rouge, vert, bleu blanc froid qui améliore le rendu des couleurs par rapport au mélange rouge vert bleu. Aussi, en associant une diode blanche à InGaN, sept DELs de couleurs et du phosphore jaune il est possible de simuler précisément la répartition spectrale de la lumière du jour, ce qui permet d'éviter les effets nuisibles du métamérisme (Mottier, 2008). Sur la base de ces acquis, nous avons choisi de réaliser un simulateur solaire D_{65} à partir d'un assemblage de DELs de couleurs et d'une DEL blanche en l'absence de phosphore supplémentaire.

6.2.1 Simulateur solaire D_{65} à huit DELs

Les huit composantes DEL s sont choisies de sorte que la distribution de l'irradiance de la source obtenue couvre au mieux le domaine spectral de l'illuminant D_{65} ; c'est-à-dire de 300 nm à 830 nm. Nous avons également veillé à ce que le profil spectral de cette irradiance présente le minimum de discontinuité sur le domaine spectral considéré. Le verre et le plastique ne transmettant pas au-dessous de 360 nm, nous nous sommes contenté de considérer le domaine spectral 350 - 850 nm avec comme limites aux extrémités une DEL UV de $\lambda_d^1 = 365 \text{ nm}$ et une DEL rouge de $\lambda_d^2 = 820 \text{ nm}$. Noter également qu'on n'a pas tenu compte des aspects DEL blanche-froide ou DEL blanche-chaude pour le choix de notre DEL blanche. Le tableau 6.1 montre les références des huit composantes DEL s du dispositif expérimental.

Tableau 6.1 Référence des huit DELs composant le simulateur solaire D₆₅

| N° | Couleur | λ_d (nm) | P (mW) @ 20 mA | Code | Fabriquant |
|----|---------|------------------|-------------------|--------------------|----------------|
| 1 | UV | 365 | 2,4 - 6 | XSL-365-5E | R. L. GmbH |
| 2 | Verte | 535 | n/sp | C503B-GCS-CY0C0791 | CREE |
| 3 | Jaune | 589 | n/sp | OVLFY3C7 | TT Electronics |
| 4 | Rouge-1 | 680 | 25 mW/sr | LED680-02AU | R. L. GmbH |
| 5 | Rouge-2 | 720 | 07 | ELD720-524 | R. L. GmbH |
| 6 | Rouge-3 | 760 | 10 | LED760/940-04A | R. L. GmbH |
| 7 | Rouge-4 | 820 | 18 | LED820-01AU | R. L. GmbH |
| 8 | Blanche | 460 | n/sp | W54L5111P | R. L. GmbH |

Les paramètres d'acquisition de données choisis sont un temps **d'intégration de 3 ms**, un **Scan Average de 10** et un **Boxcar width de 2** afin d'éviter la saturation du spectromètre et d'optimiser les performances du système. Les figures 6.4 et 6.5 montrent respectivement une photo et un schéma simplifié du montage expérimental du processus de calibration du simulateur solaire D₆₅ indépendamment du nombre de DELs utilisés.

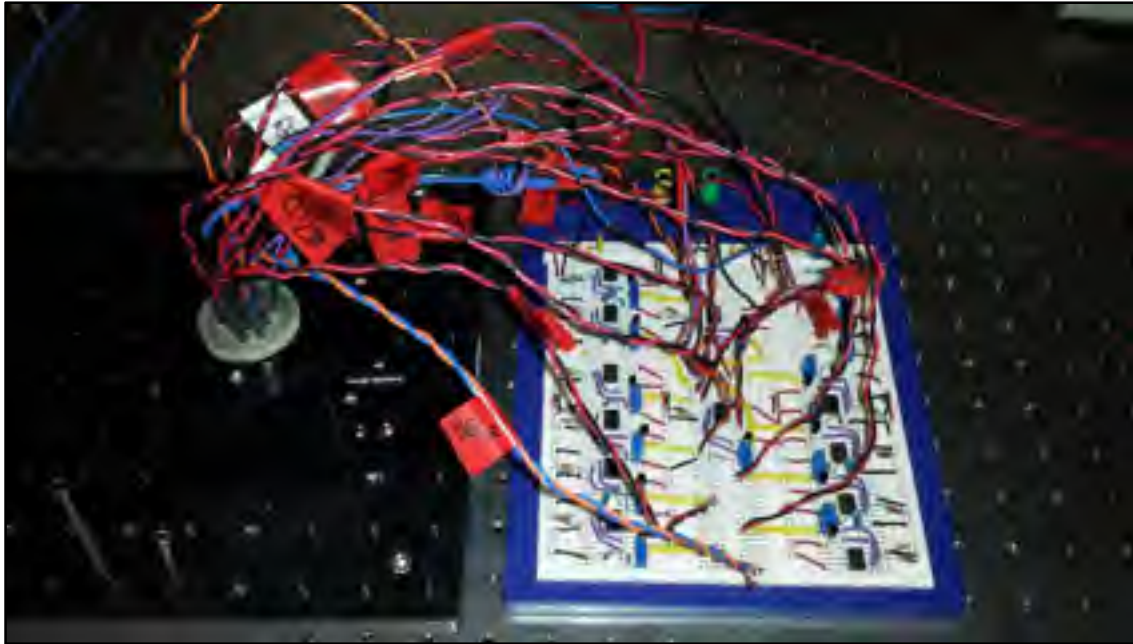


Figure 6.4 Montage expérimental du processus de calibration du simulateur solaire D₆₅

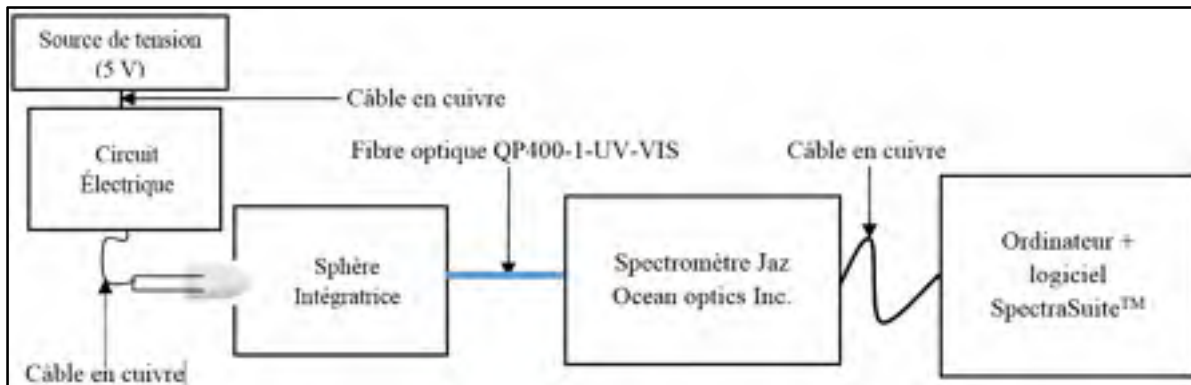


Figure 6.5 Schéma simplifié du montage expérimental utilisé pour la calibration du simulateur solaire D₆₅

Les huit DELs sont fixées à l'entrée d'une sphère intégratrice via le bouchon support. La sphère intégratrice est connectée à un spectromètre Jaz par le câble à fibre optique QP400-1-UV-VIS et le spectromètre Jaz est connecté à un PC via un câble USB en cuivre. Une fois le montage réalisé, le premier défi est d'ajuster les intensités lumineuses des différentes DELs pour obtenir une source blanche ayant une TCP de 6504 K et des coordonnées de chromaticité x et y égales à celles de l'illuminant D₆₅ dans le diagramme de chromaticité CIE (x , y) 1931. Par la suite, on procède à l'optimisation du profil spectral de l'irradiance du simulateur, qui doit être le plus semblable que possible à celui de l'illuminant normalisé D₆₅

de la CIE, sans trop modifier les valeurs optimales de la TCP, de x et de y obtenues. La figure 6.6 donne une comparaison du profil spectral de la SPD du simulateur solaire D_{65} à huit DELs réalisé à celui de la SPD de l'illuminant normalisé D_{65} de la CIE. On peut remarquer des disparités entre les deux courbes caractérisées par la présence de pics et de vallées très prononcés au niveau de la courbe représentant la SPD du simulateur solaire D_{65} à huit DELs. Cette limitation est principalement due à l'absence du phosphore supplémentaire pour convertir certaines longueurs d'onde courtes en longueurs d'onde plus longues et à l'étroitesse des spectres d'émission des DELs de couleur.

Du point de vue "*match spectral*", la comparaison de la distribution spectrale de l'énergie du simulateur aux standards pour le mode AM 1.5 G est illustrée par la figure 6.7. Ce résultat montre que le simulateur solaire D_{65} à huit DELs réalisé est de **Classe B** par rapport à ce critère de performance.

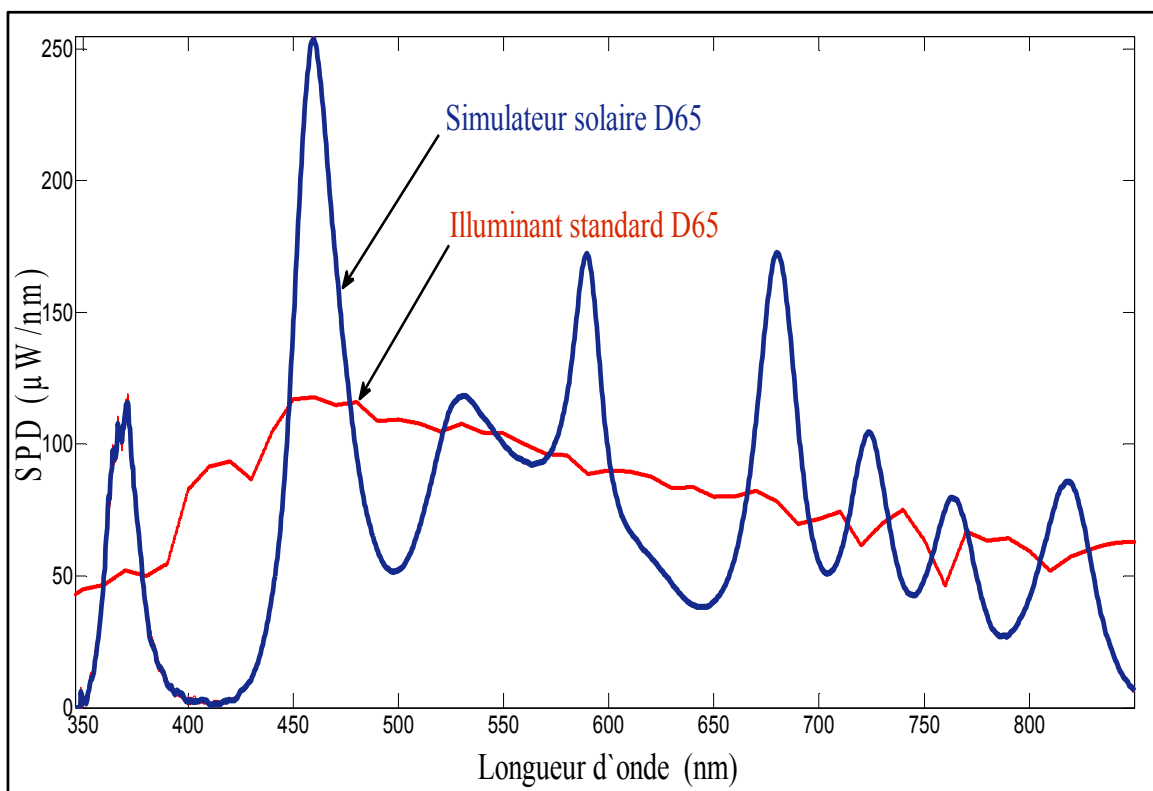


Figure 6.6 Profil spectral de la SPD du simulateur D_{65} solaire à huit DELs comparé à celui de la SPD de l'illuminant normalisé D_{65} de la CIE

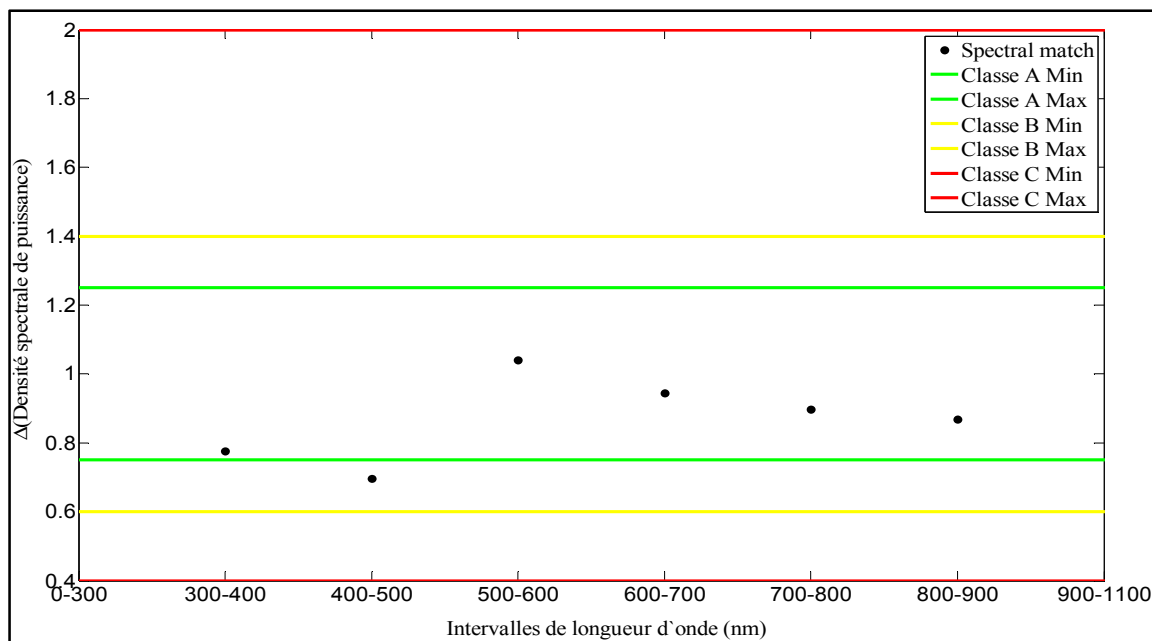


Figure 6.7 "Spectral match" de l'irradiance du simulateur solaire D₆₅ à huit DELs évalué par rapport à la norme E927 10 d'ASTM

Le tableau 6.2 donne un résumé des caractéristiques colorimétriques du simulateur solaire à huit DELs fournies par SpectraSuite. La colonne des facteurs représente le rapport des valeurs d'un paramètre colorimétrique de l'illuminant normalisé D₆₅ et du simulateur solaire D₆₅. On note une bonne optimisation des valeurs de stimuli X, Y et Z, des coordonnées de chromaticité x, y et z et de la TCP. Ce résultat est prévisible dans la mesure où ces paramètres peuvent être optimisés avec une source blanche réalisée à partir des trois primaires.

Tableau 6.2 Comparaison des caractéristiques colorimétriques du simulateur solaire D₆₅ à huit DELs à celles de l'illuminant normalisé D₆₅ de la CIE

| Paramètres colorimétriques | Simulateur Solaire D ₆₅ | Illuminant Normalisé D ₆₅ | Facteurs |
|----------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|----------|
| X | 95.06 | 95.04 | 1.000 |
| Y | 99.99 | 100 | 1.000 |
| Z | 108.86 | 108.9 | 1.000 |
| x | 0.3126 | 0.3128 | 1.00 |
| y | 0.3296 | 0.3290 | 1.00 |
| z | 0.3578 | 0.3582 | 1.00 |
| CRI | 79.3 | 100 | -- |
| TCP (°K) | 6507 | 6504 | -- |

Puisque l'assemblage de DELs utilisé comporte une DEL blanche, le CRI ne traduira pas fidèlement le rendu de couleur du spectre lumineux résultant (Dick Erdmann 2013). De plus, le CRI n'est pas un critère de performance pour un simulateur solaire destiné à des applications photovoltaïques, cependant, plus le CRI d'une source blanche est élevée, mieux celle-ci représente une approximation de la lumière blanche émise par les lampes incandescentes à halogène ou la lumière naturelle du jour. Des LEDs blanches ayant des CRI de 98 sont commercialisées par BEIJING YUJI INTERNATIONAL (Yuji, 2014).

6.2.2 Simulateur solaire D₆₅ à dix LEDs

Pour améliorer le "*spectral match*" du simulateur solaire, nous avons proposé d'ajouter deux DELs; une DEL violet VL400-5-15 ($\lambda_{pic} = 400 \text{ nm}$) et la DEL rouge L-53SRC-E ($\lambda_{pic} = 640 \text{ nm}$), ce qui porte le nombre de DELs qui constitue le simulateur solaire D₆₅ à dix. Ces deux DELs nous permettraient de réduire les grandes vallées situées à au voisinage de leurs longueurs d'onde pics. Dans les mêmes conditions d'expérimentation, le profil spectral de la SPD obtenu comparé à celui de la SPD de l'illuminant D₆₅ est présenté à la figure 6.8. On peut noter une réduction considérable l'intensité des pics et des vallées au niveau du profil spectral de la SPD du simulateur; ce qui équivaut à une nette amélioration de son profil spectral sur le domaine spectral considéré.

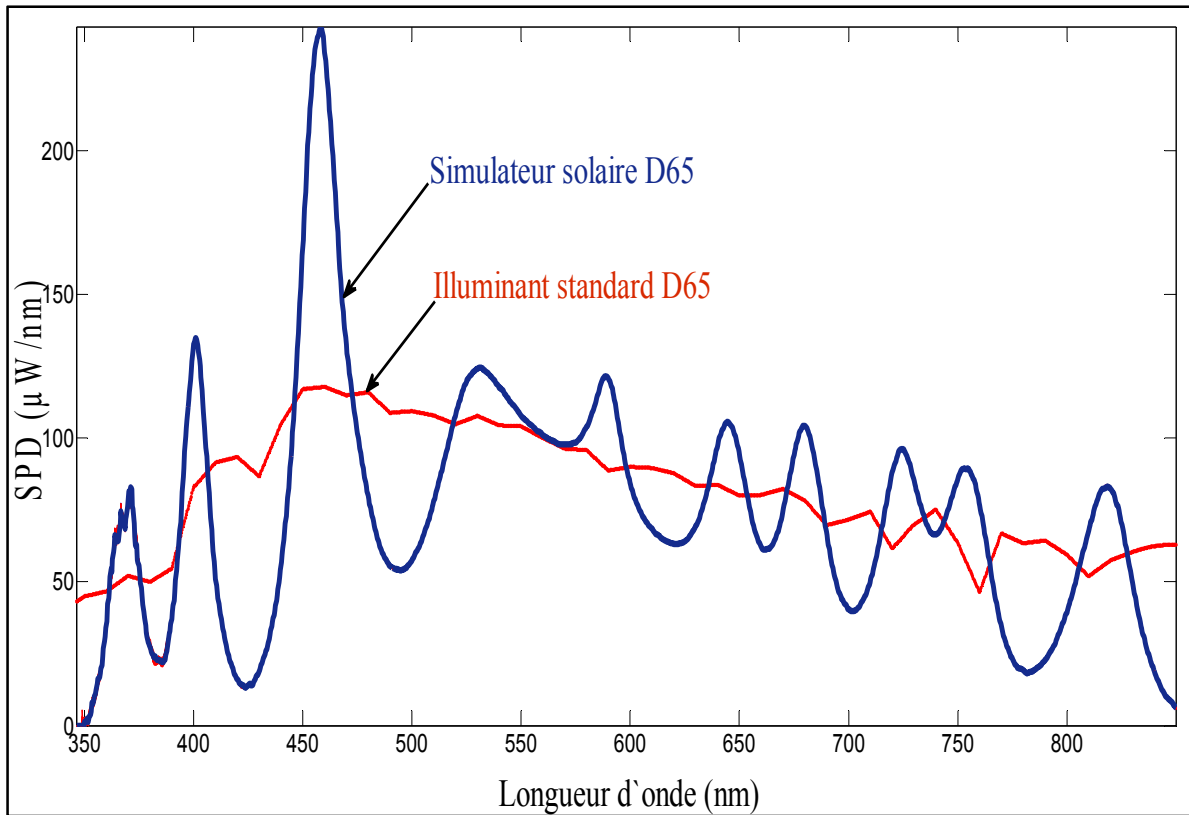


Figure 6.8 Profil spectral de la SPD du simulateur D₆₅ solaire à dix DELs comparé à celui de la DEL de l'illuminant normalisé D₆₅ de la CIE

Du point de vue "*spectral match*", la figure 6.9 montre une amélioration qui se traduit par le passage du simulateur solaire D₆₅ de la **Classe B** à la **Classe A** de ce critère de performance en mode AM 1.5 G, soit une excellente densité spectrale de l'irradiance approximant la lumière moyenne du jour. Étant donné que l'optimisation des paramètres colorimétriques du simulateur solaire D₆₅ est déjà établie avec les huit DELs, nous ne jugerons pas utile de dresser de nouveau un tableau illustrant une comparaison de ces paramètres à ceux de l'illuminant normalisé D₆₅ pour le cas du simulateur solaire D₆₅ à dix DELs.

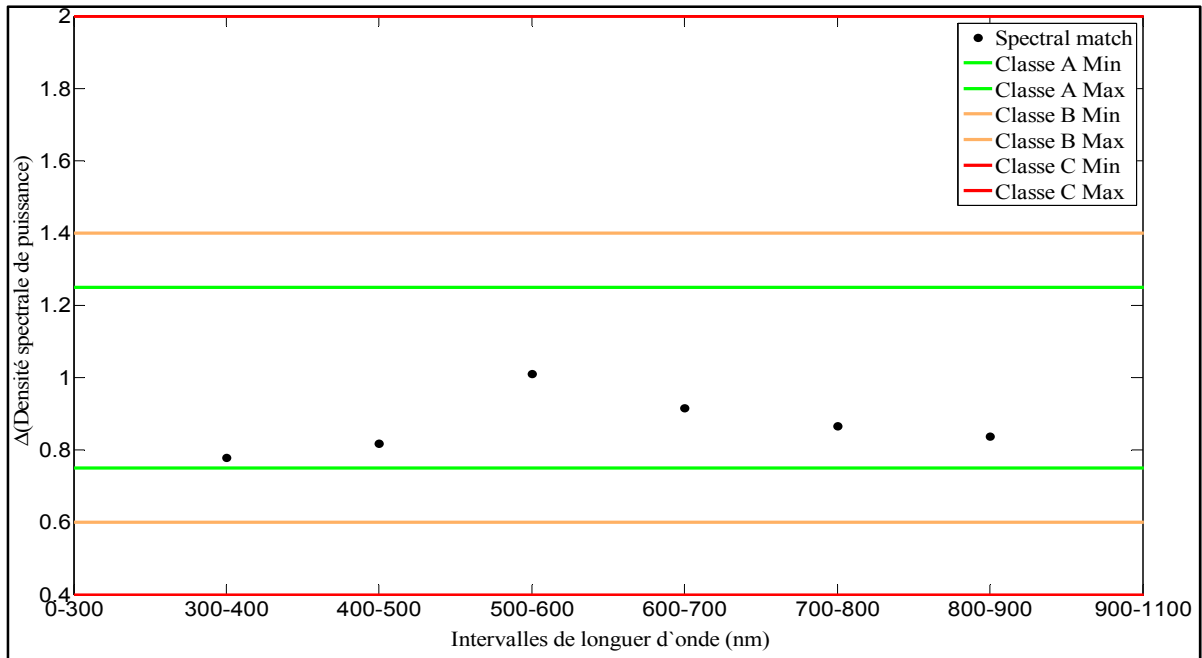


Figure 6.9 "Spectral match" de l'irradiance du simulateur solaire D₆₅ à dix DELs évalué par rapport à la norme E927 10 d'ASTM

Quant au CRI, on note une augmentation de l'ordre de dix unités soit 89,4. Pour une meilleure optimisation du profil spectral et éventuellement porter le CRI à une valeur plus élevée, on a procédé à l'ajout de deux DELs supplémentaires.

6.2.3 simulateur solaire D₆₅ douze DELs

Les deux DELs ajoutées sont la LED bleue DEL425-0-30 à $\lambda_{pic} = 425 \text{ nm}$ et la DEL verte bleue B5-433-B505 à $\lambda_{pic} = 505 \text{ nm}$. En se référant au profil spectral de la SPD du simulateur à dix DELs, l'ajout de ces deux DELs devrait nous permettre d'améliorer le "spectral match". Les paramètres d'acquisition du système et le processus de calibration du simulateur restent inchangés. Les figures 6.10 et 6.11 donnent respectivement les caractéristiques colorimétriques et le profil spectral de la SPD du simulateur solaire D₆₅ réalisé. On note d'excellentes caractéristiques colorimétriques avec une TCP de 6502 K et un CRI de 98.5 qui franchissent de loin le seuil d'éligibilité de 92 d'une source lumineuse comme simulateur solaire. La présence de pics plus prononcés au niveau de la SPD que ceux observés au niveau de celle du simulateur solaire à dix DELs, illustrés par la figure 6.10,

s'explique par le fait que le simulateur solaire D₆₅ à douze DELs présente une puissance optique légèrement supérieure, de façon uniforme, à celle du simulateur solaire à dix DELs. L'intérêt est de disposer d'une marge de puissance supplémentaire pour prévoir les atténuations lors des expériences de test où le simulateur est placé à une distance plus ou moins importante de la surface test. On a également un meilleur équilibre entre les intensités des pics du spectre que dans le cas précédent.

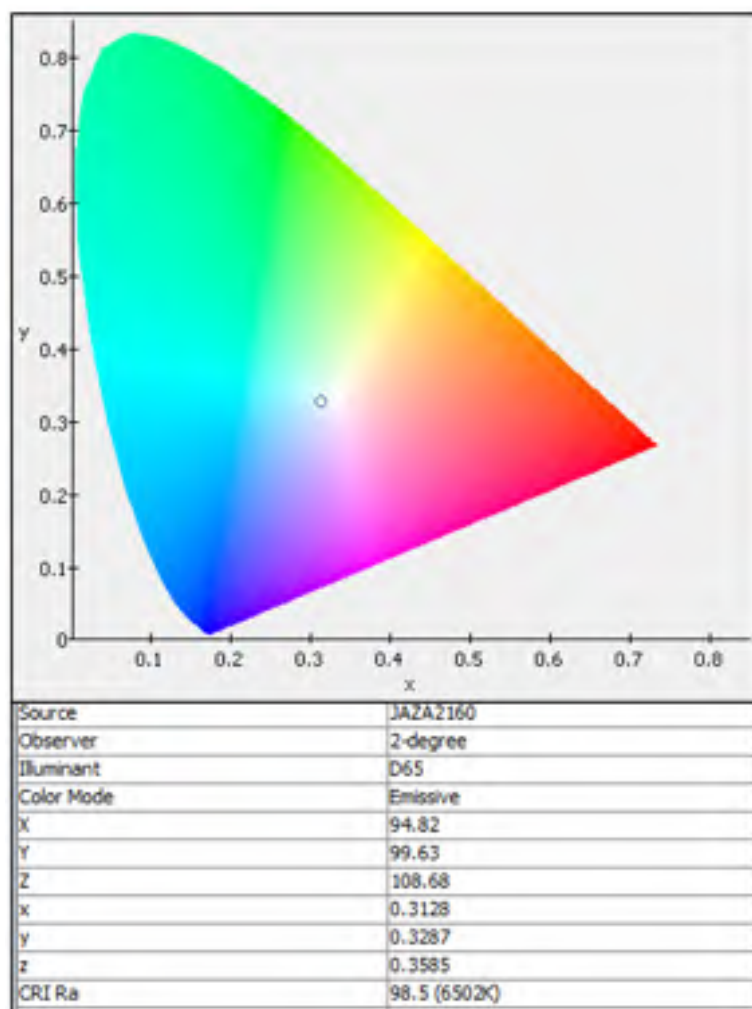


Figure 6.10 Caractéristiques colorimétriques du simulateur solaire D₆₅ à douze DELs

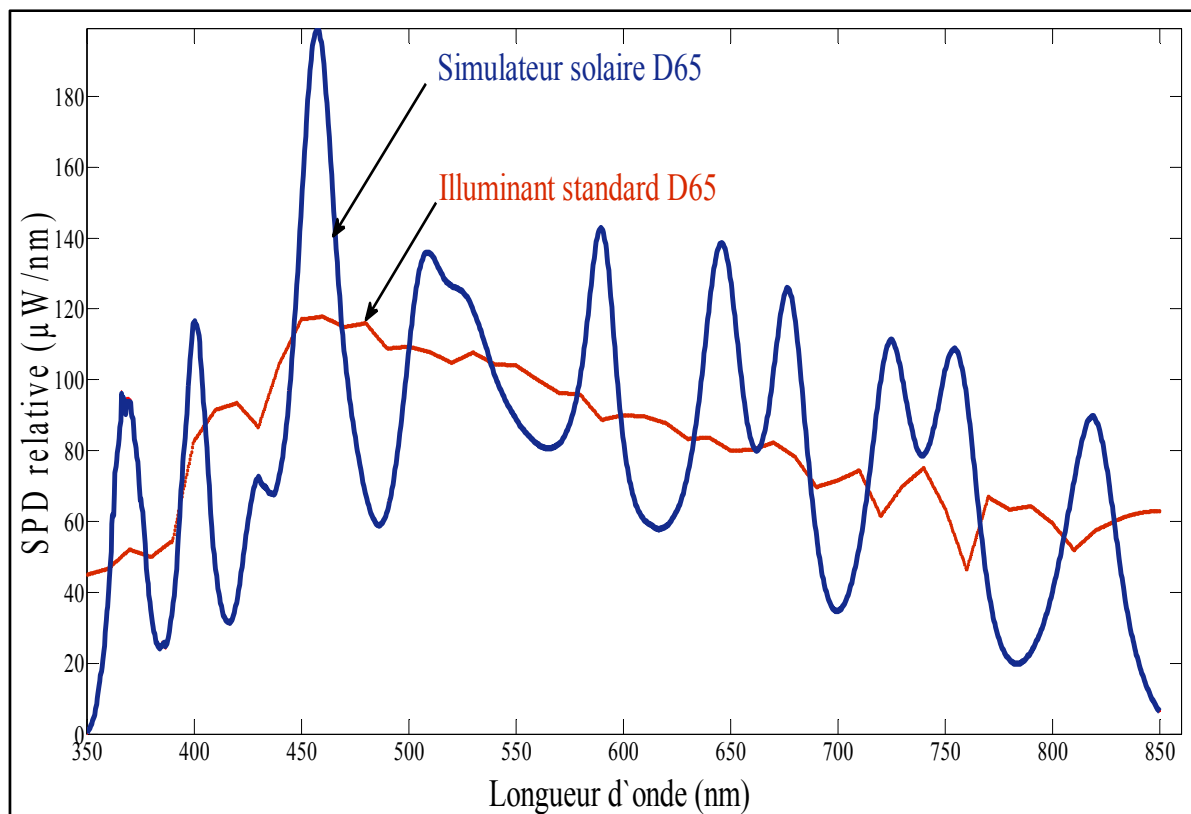


Figure 6.11 Profil spectral de la SPD du simulateur D₆₅ solaire à douze DELs comparé à celui de la SPD de l'illuminant normalisé D₆₅ de la CIE

En reprenant l'évaluation du "*spectral match*", les résultats obtenus sont compilés à la figure 6.12. On remarque que, la variation de l'intensité de l'irradiance spectrale I du simulateur à douze DELs sur le domaine spectral 350 nm - 900 nm vérifie la condition établie par l'équation 6.1 pour un simulateur solaire de classe A dans la classification standard ASTM 927 E 10 au mode AM1.5G.

$$0.75I_0 \leq I \leq 1.25I_0 \quad (6.1)$$

Avec

I_0 la valeur moyenne de l'irradiance spectrale définie dans la norme ASTM E927-10.

Cette validation renforce d'avantage la **Classe A** du simulateur solaire du point de vue "*spectral match*".

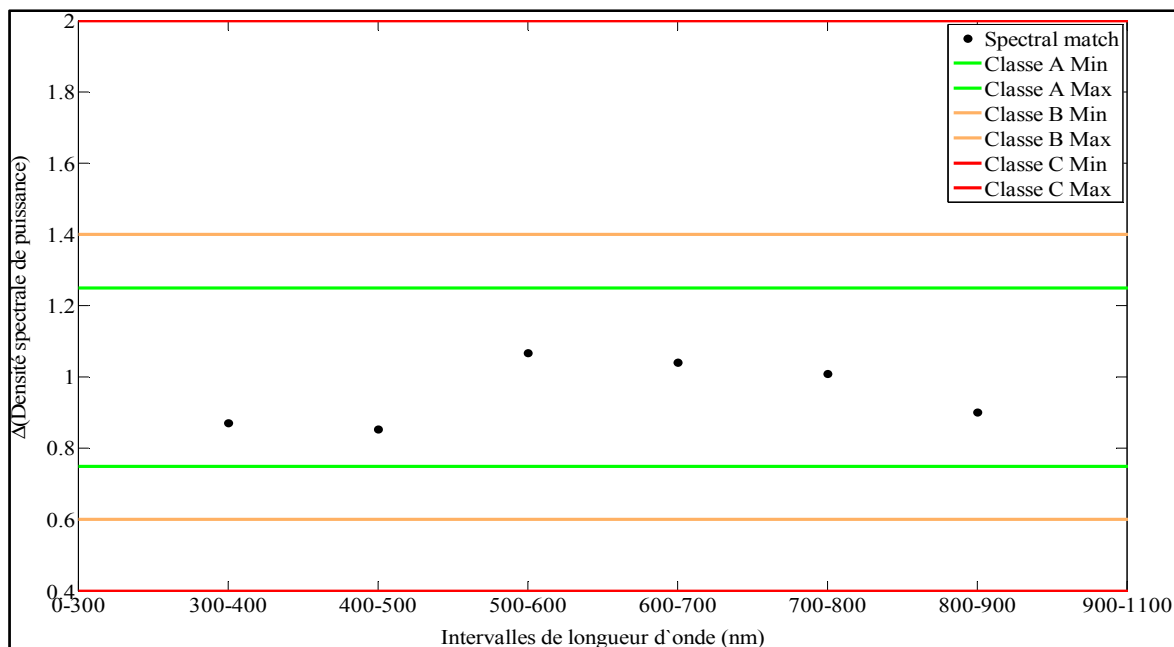


Figure 6.12 " Spectral match "de l'irradiance du simulateur solaire D₆₅ à douze DELs évalué par rapport à la norme E927 10 d'ASTM

Le bilan montre que sur la base des spécifications standard, seules la non-uniformité spatiale et la stabilité temporelle de l'irradiance restent à déterminer pour le simulateur solaire D₆₅.

6.2.3.1 Non-uniformité spatiale de l'irradiance

La détermination de la non-uniformité spectrale de l'irradiance nécessite une nouvelle calibration du système d'acquisition des données. Pour cette prise de mesures, on remplace la sphère intégratrice par le diffuseur DG 10-600-MD (diffuseur gaussien) du fabricant Thorlabs (à la place d'un diffuseur sinusoïdal CC-3 (diffuseur lambertien) qui serait le composant idéal). L'environnement est mis à l'abri de toute lumière parasite. Les autres étapes de la calibration restent pratiquement inchangées. Après la calibration, le simulateur est fixé sur un support rotatif grâce à un moteur électrique lui permettant de tourner horizontalement autour de l'axe central du câble QP400-1-UV-VIS. On place de nouveau le diffuseur DG 10-600-MD devant le simulateur pour une meilleure uniformité de la lumière de sortie. Pour la prise de mesures, on fixe les paramètres d'acquisition du système *temps d'intégration à 1 ms*, *le Scan Average à 1* et *le Boxcar width à 0*. La figure 6.13 montre la

photo du montage expérimental; un schéma simplifié du dispositif est présenté à la figure 6.14.

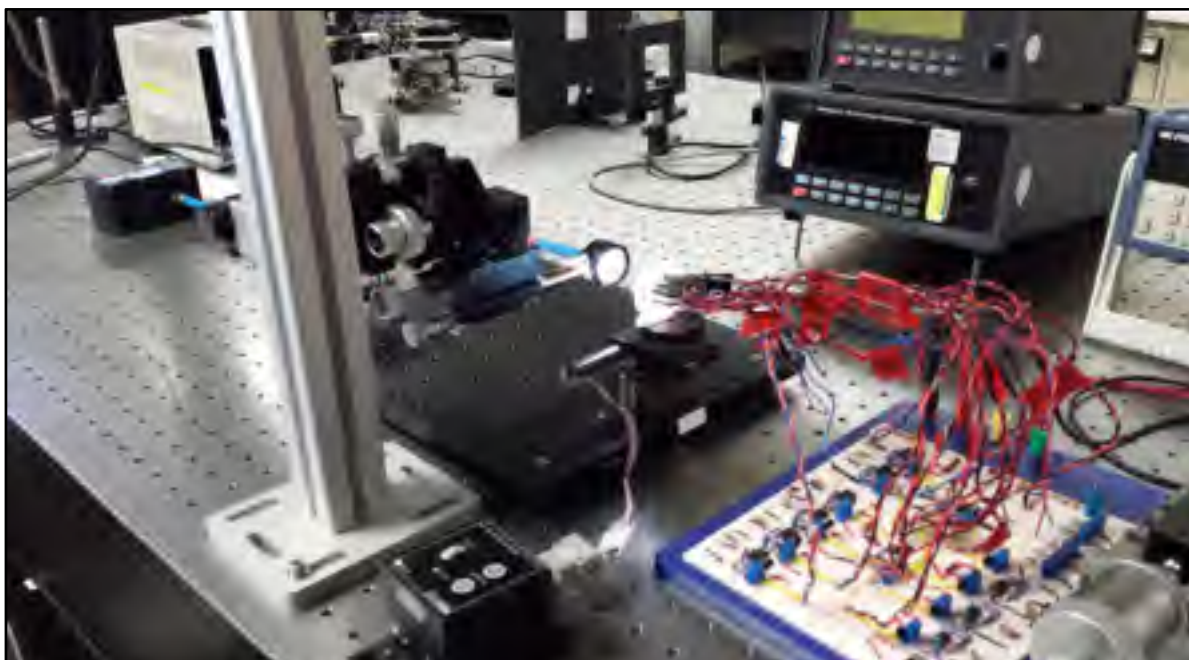


Figure 6.13 Dispositif expérimental pour la mesure de la non-uniformité spatiale de l'irradiance du simulateur solaire à douze DELs

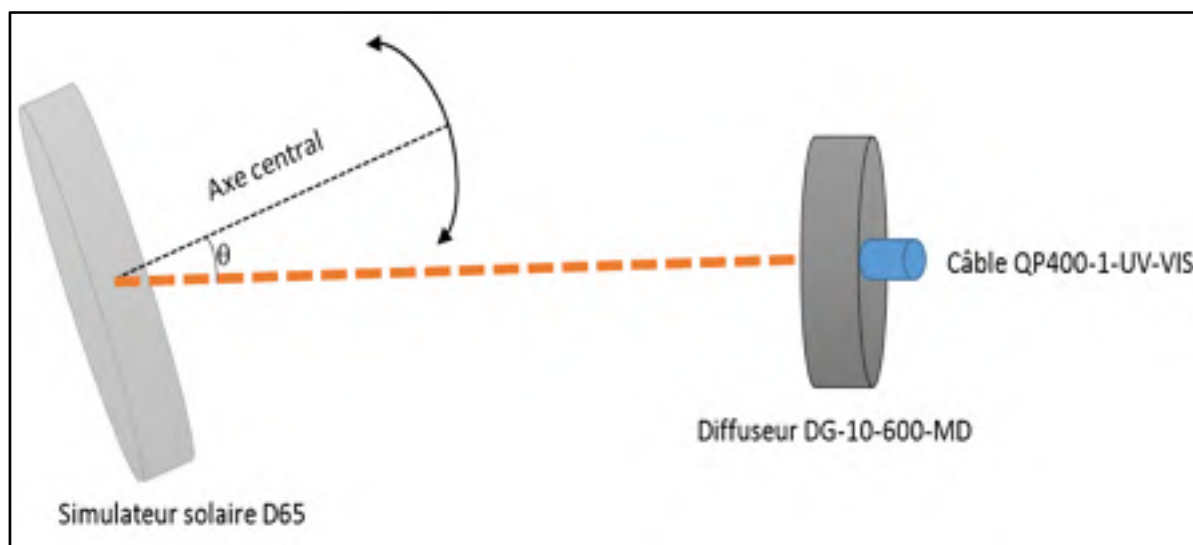


Figure 6.14 Technique d'évaluation de la non-uniformité spatiale de l'irradiance du simulateur solaire D_{65}

L'évaluation de l'uniformité spatiale de l'irradiance est effectuée sur des surfaces test situées à des distances de 10 et 15 cm du simulateur solaire. On effectue des rotations du simulateur par pas d'angles d'un degré au tour de l'axe central (ligne en pointillés) du câble QP400-1-UV-VIS et le spectromètre enregistre l'irradiance spectrale à chaque position. Les résultats obtenus de la compilation des données recueillies à l'aide d'un programme Matlab sont présentés aux figures 6.15 et 6.16. Une évaluation sur une surface teste située à 5 cm nécessite un filtre supplémentaire, à cause de la forte non-uniformité de l'irradiance spectrale du simulateur solaire notée à cette position, ce qui entraîne une forte diminution de la puissance.

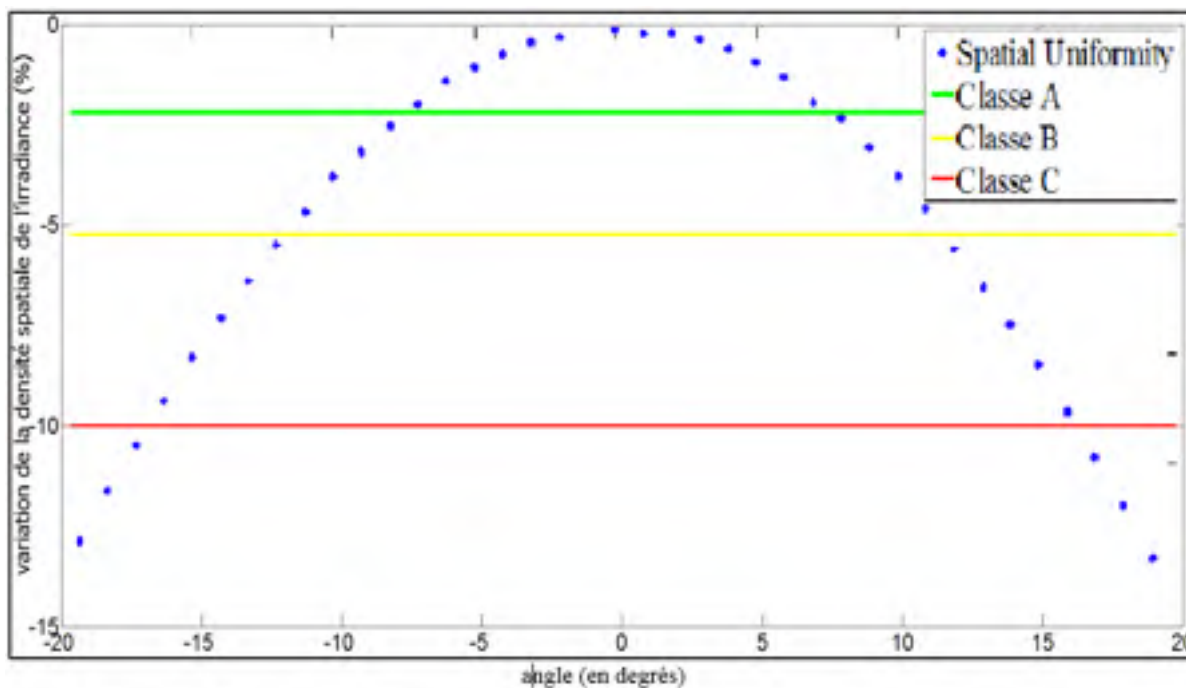


Figure 6.15 Non-uniformité spatiale de l'irradiance du simulateur solaire D₆₅ à douze DELs sur une surface test située à 10 cm

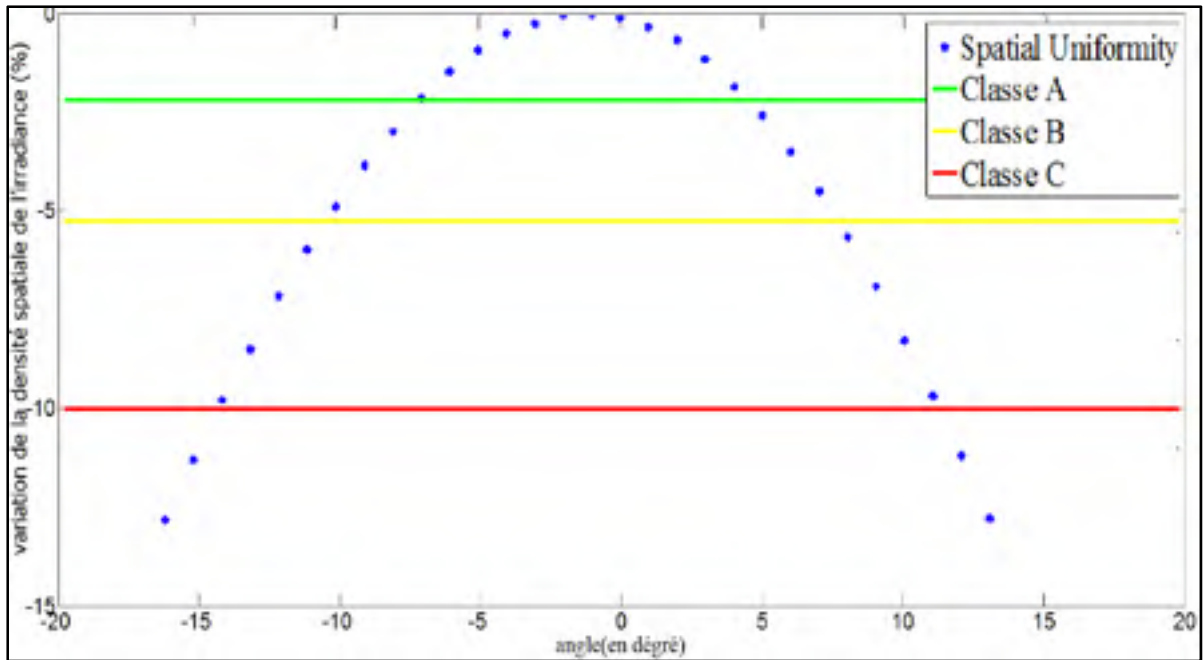


Figure 6.16 Non-uniformité spatiale de l'irradiance du simulateur solaire D₆₅ à douze DELs sur une surface test située à 15 cm

L'analyse des résultats consiste à évaluer la variation de la densité spatiale de l'irradiance du simulateur sur la section de surface test illuminée sous le cône de demi-angle au sommet θ et déduire la classe du simulateur solaire correspondant à la non-uniformité spatiale de l'irradiance sur cette section de surface. La section de surface illuminée sous le cône de demi-angle θ est donnée par l'équation 6.2.

$$S_{\text{Test}} = \pi(d * \tan\theta)^2 \quad (6.2)$$

Avec

d : distance entre le simulateur solaire D_{65} et la surface test

S_{Test} : section de surface test illuminée sous une classe donnée

Les surfaces test pour lesquels la non-uniformité spatiale de l'irradiance du simulateur est successivement inférieure ou égale à 3, 5 et 10% respectivement permises pour un simulateur solaire de classe A, B et C de ce critère de performance sont celles représentées par les sections de courbes situées au-dessus de la droite représentant le seuil de tolérance en non-

uniformité spatiale de l'irradiance de la classe correspondante. Le tableau 6.3 donne les sections de surfaces test correspondant à chaque classe du simulateur de ce critère de performance en fonction de la distance entre la surface test et le simulateur.

Tableau 6.3 Classes du simulateur solaire D₆₅ à douze DELs du point de vue uniformité spatiale de l'irradiance en fonction de la distance du simulateur à la surface test et de l'aire de la surface illuminée

| Distances (cm) | 10 | | | 15 | | |
|-------------------------------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| Classe | A | B | C | A | B | C |
| θ (degrés) | 07.50 | 11.75 | 16.30 | 05.75 | 09.00 | 12.60 |
| S_{Test} (cm ²) | 05.445 | 13.592 | 26.864 | 6.920 | 17.732 | 35.317 |

Ces résultats montrent que l'uniformité spatiale de l'irradiance est optimale sur une section de surface test située aux voisinages de 10 cm du simulateur solaire. Une surface test distante de 15 cm du simulateur offre une légère augmentation des sections de surfaces correspondant aux différentes classes mais les demi-angles au sommet de leurs cônes d'illumination diminuent comparés à ceux des sections de surface test correspondantes situées à 10 cm du simulateur. Ceci indique une uniformité spatiale de l'irradiance plus optimale sur une surface test distante de 10 cm du simulateur que sur celle située à 15 cm. Cela peut se justifier par le fait que le bouchon support des DELs soit conçu de telle sorte que tous les axes de rayonnement des DELs composant le simulateur convergent au centre du fond de la sphère intégratrice qui se situe à environ 8.5 cm de son ouverture. Cependant, puisque toutes les DELs n'ont pas des diagrammes de rayonnement identiques, la détermination de la position exacte de la surface test qui donne la meilleure uniformité spatiale de l'irradiance du simulateur peut être délicate. Il est également très difficile de faire une interprétation approfondie des résultats obtenus par cette méthode car la densité de puissance maximale dans le câble QP400-1-UV-VIS ne correspond pas au profil spectral de l'irradiance du simulateur solaire représenté aux figures 6.11 et 6.12. L'utilisation d'une lentille de focalisation pourrait être une solution permettant une caractérisation plus rigoureuse, cependant, cette option pourrait modifier la distribution spatiale de l'irradiance sur les

surfaces test et conduire à des résultats qui ne rendent pas compte du profil spectral réel du simulateur solaire.

6.2.3.2 Évaluation de l'instabilité temporelle de l'irradiance

Le simulateur solaire D₆₅ fonctionne en mode statique et n'intègre pas un système d'acquisition de données, on peut utiliser l'équation 4.2 pour évaluer son instabilité temporelle d'irradiance. Le système de mesure est celui utilisant le mode de calibration avec sphère intégratrice. Nous avons procédé à une série d'acquisition de la SPD par pas de 5 millisecondes sur une durée de 5 minutes avec comme paramètres d'acquisition *temps d'intégration à 1 ms*, *Scan Average à 1* et *Boxcar width à 0*. Les données recueillies sont compilées à l'aide d'un programme Matlab pour évaluer le comportement temporel de l'irradiance spectrale du simulateur et la comparer aux standards. La figure 6.17 montre une fluctuation maximale de l'irradiance spectrale égale à 0.7106% dans l'intervalle de temps considéré. Cette valeur est nettement inférieure au seuil de 2% établi dans les standards pour un simulateur solaire de **Classe A** selon ce critère de performance.

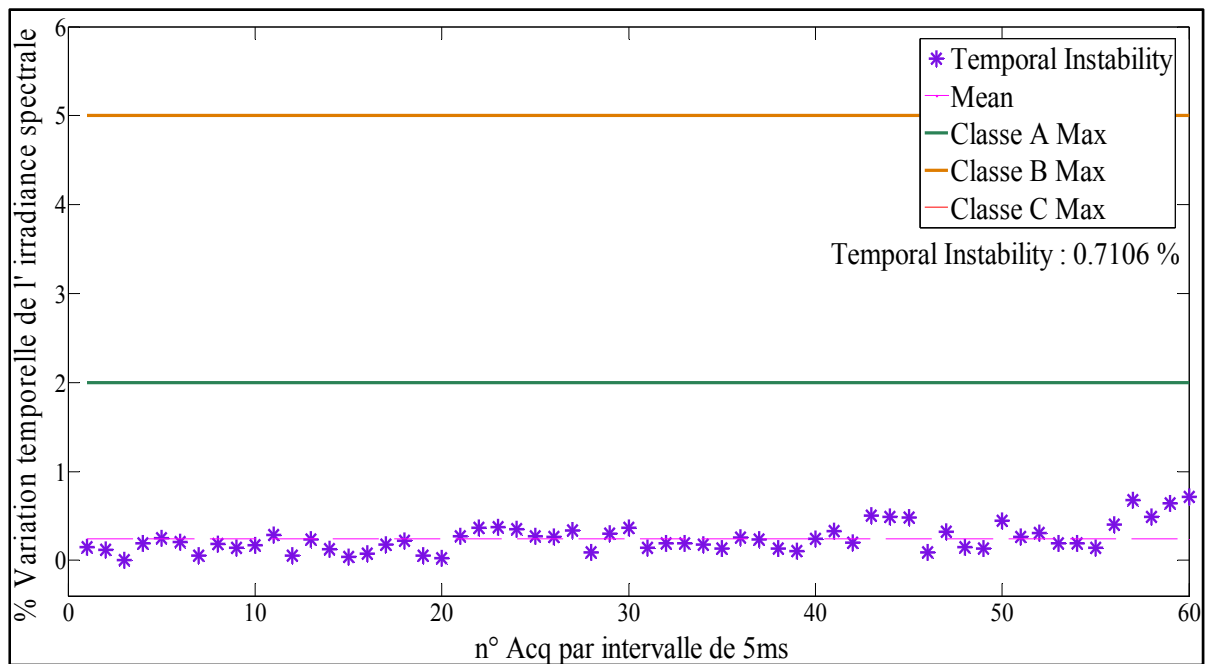


Figure 6.17 Instabilité temporelle de l'irradiance du simulateur solaire D₆₅ à douze DELs mesurée sur un intervalle de temps de 300 s par pas de 5 ms

En résumé, nous avons réalisé un simulateur solaire D_{65} à douze DELs de Classe A en match spectral et instabilité temporelle de l'irradiance et de Classe A en uniformité spatiale de l'irradiance sur des sections de surfaces test de **5.445 cm²** et de **6.920 cm²** distantes respectivement de **10 cm** et **15 cm** du simulateur solaire. Puisque le bouchon support des DELs peut supporter un maximum de quatorze, nous avons eu la curiosité de porter le nombre de DELs du simulateur solaire à quatorze dans le but d'améliorer la section de surface test distante de 10 cm illuminée par le simulateur solaire de **classe AAA**.

6.2.4 Simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs

Avec le simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs, nous visons à améliorer la surface test distante de 10 cm du simulateur solaire D_{65} à douze DELs de classe AAA. Les DELs supplémentaires sont la composante rouge de la RGBE ($\lambda_{pic} = 627.5$ nm) et la 780-01AU ($\lambda_{pic} = 780$ nm). Le tableau 6.4 résume les caractéristiques des quatorze DELs constituant le simulateur solaire D_{65} . Les paramètres d'acquisition du système ainsi que le processus de calibration du simulateur restent les mêmes que ceux de la calibration du simulateur à douze DELs. Cependant, il est bon de préciser que chaque fois que l'on déconnecte le spectromètre d'un côté, on doit refaire une nouvelle calibration pour la prise de mesures. Les figures 6.18 et 6.19 et 6.20 présentent respectivement les caractéristiques colorimétriques, le profil et le match spectral de la SPD du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs comparées aux données standard. Les caractéristiques colorimétriques TCP et CRI n'ont pratiquement pas changé comparativement à celles du simulateur à douze DELs. Cependant on a un profil spectral qui donne une meilleure approximation de celui de l'illuminant D_{65} de la CIE comme le montre la figure 6.19.

Tableau 6.4 Références des quatorze DELs composant le simulateur solaire D₆₅

| N° | λ_d (nm) | P (mW) @ 20 mA | Code | $\frac{1}{2} \theta$ cône de rayonnement | Fabriquant |
|----|------------------|-------------------|--------------------|---|----------------|
| 1 | 365 | 2,4 - 6 | XSL-365-5E | 15 | R. L. GmbH |
| 2 | 400 | 08.1 - 11,5 | VL400-5-15 | 15 | R. L. GmbH |
| 3 | 425 | 06 - 08 | LED425-6-30 | 15 | R. L. GmbH |
| 4 | 505 | n | B5-433-B505 | 15 | R. L. GmbH |
| 5 | 535 | 07 - 10 | C503B-GCS-CY0C0791 | 30 | CREE |
| 6 | 589 | n/sp | OVLFY3C7 | 20 | TT Electronics |
| 7 | 627.5 | n/sp | LEDRGBE | 30 | Thorlabs |
| 8 | 640 | n/sp | L-53SRC-E | 30 | Kingbright |
| 9 | 680 | 25 mW/sr | LED680-02AU | 07 | R. L. GmbH |
| 10 | 720 | 07 | ELD720-524 | 20 | R. L. GmbH |
| 11 | 760 | 10 | LED760/940-04A | 07 | R. L. GmbH |
| 12 | 780 | 18 | LED780-01AU | 20 | R. L. GmbH |
| 13 | 820 | 18 | LED820-01AU | 10 | R. L. GmbH |
| 14 | 460 | n/sp | W54L5111P | 15 | R. L. GmbH |

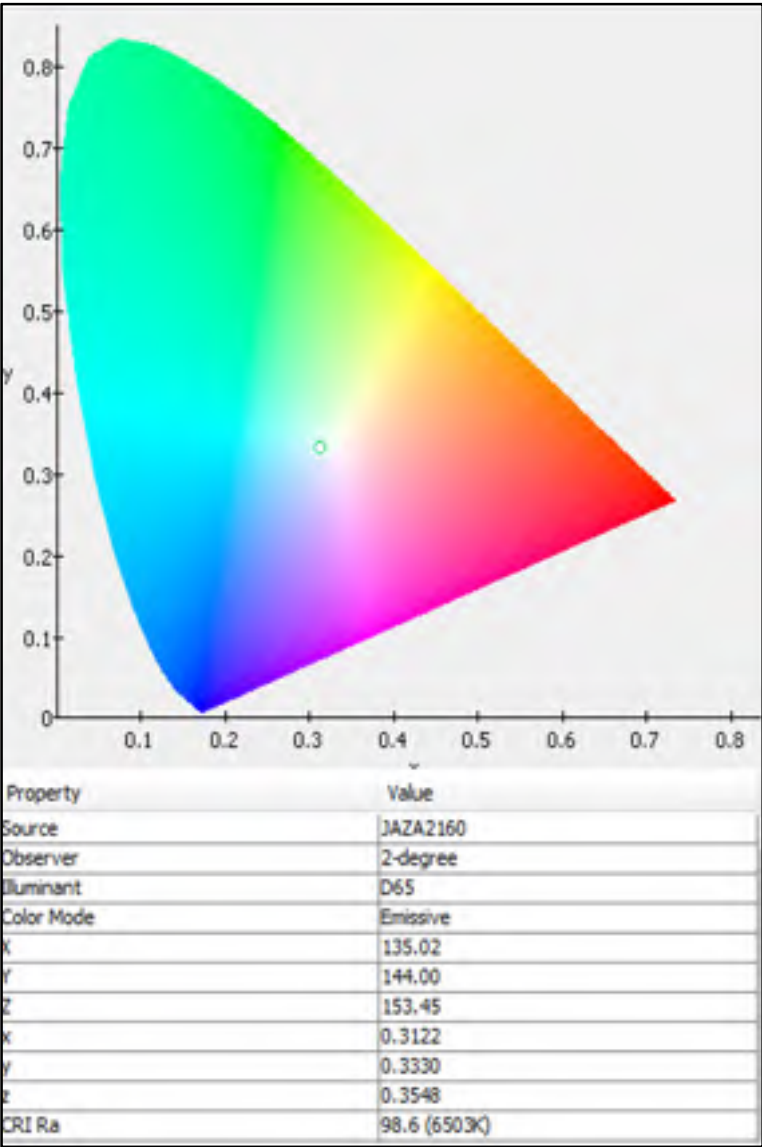


Figure 6.18 Caractéristiques colorimétriques du simulateur solaire D₆₅ à quatorze DELs

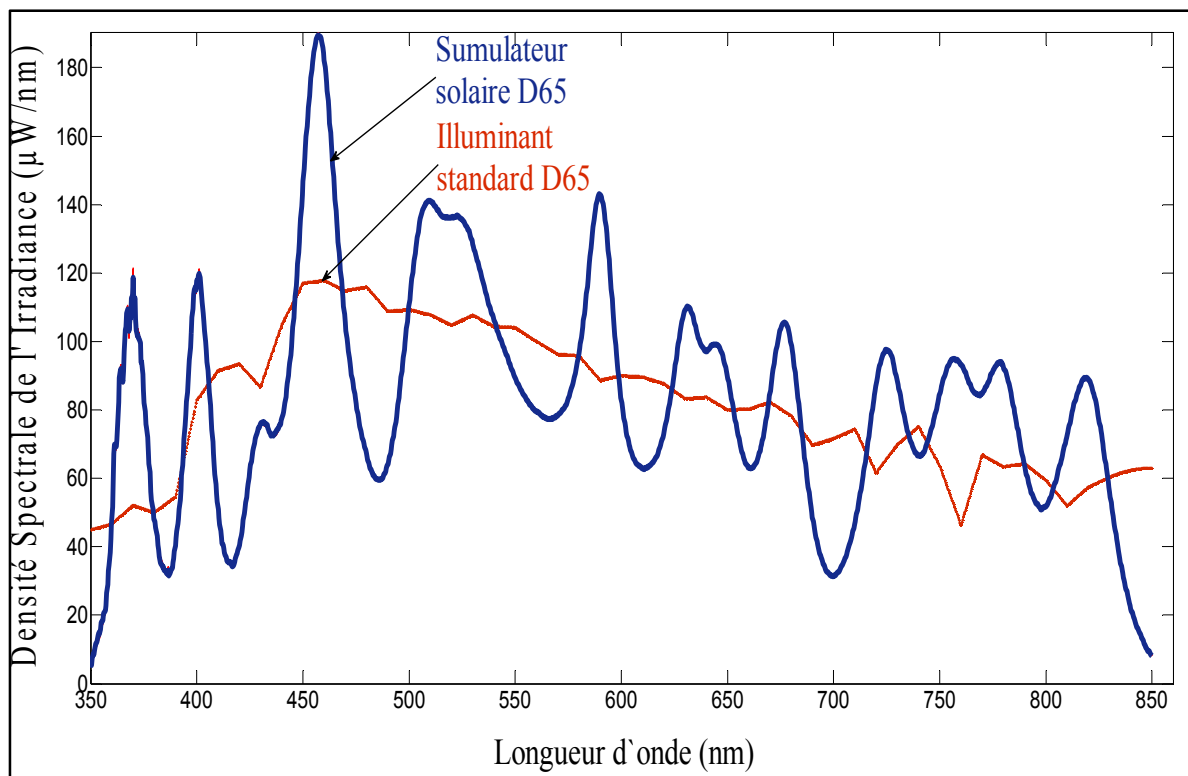


Figure 6.19 Profil spectral de la SPD du simulateur D₆₅ solaire à quatorze DELs comparé à celui de la SPD de l'illuminant normalisé D₆₅ de la CIE

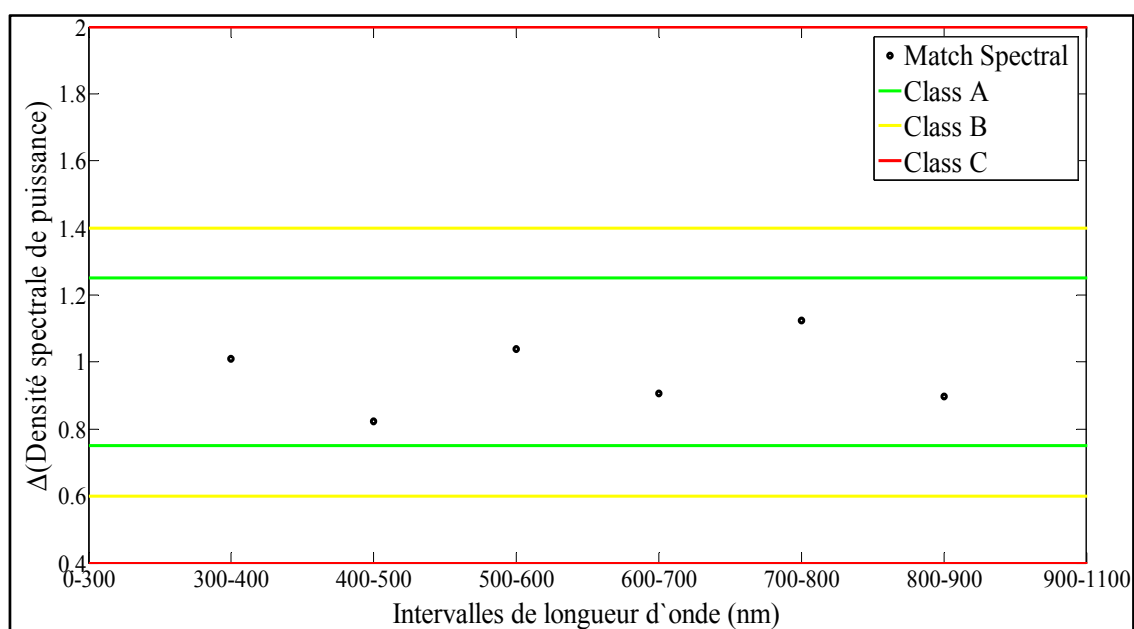


Figure 6.20 "Spectral match " de l'irradiance du simulateur solaire D₆₅ à quatorze DELs évalué par rapport à la norme E927 10 d'ASTM

6.2.4.1 Lissage du profil spectral de la SPD du simulateur solaire à quatorze DELs

On ne dispose pas d'un modèle mathématique des ellipses de MacAdam. Cependant leur représentation sur le diagramme de chromaticité CIE (x, y) 1931 de la figure 2.5 nous a permis de faire les approximations ci-dessous :

- $380 \text{ nm} \leq \lambda \leq 550 \text{ nm}$, les ellipses de MacAdam s'étendent en moyenne sur 5 nm,
- $550 \text{ nm} \leq \lambda \leq 650 \text{ nm}$, les ellipses de MacAdam s'étendent en moyenne sur 30 nm,
- $650 \text{ nm} \leq \lambda \leq 680 \text{ nm}$, les ellipses de MacAdam s'étendent en moyenne sur 10 nm,
- $350 \text{ nm} \leq \lambda \leq 380 \text{ nm}$ et $680 \text{ nm} \leq \lambda \leq 850 \text{ nm}$: les ellipses de MacAdam s'étendent en moyenne sur 5 nm par extrapolation.

Sur un domaine de longueurs d'onde donné, la SPD du simulateur solaire est obtenue en faisant la somme des SPDs constantes par pas de $\Delta\lambda$ équivalente à la largeur spectrale couverte par les ellipses de MacAdam de ce domaine. Les valeurs constantes des SPDs sur les différents pas $\Delta\lambda$ de longueur d'onde d'un domaine spectral sont obtenues en faisant successivement la moyenne arithmétique des valeurs extrêmes de la SPD du simulateur solaire aux longueurs d'onde extrêmes de chaque $\Delta\lambda$. Le profil spectral de la SPD du simulateur D_{65} à quatorze DELs lissé sur la base de ces approximations comparé à celui de la SPD de l'illuminant D_{65} est représenté à la figure 6.21.

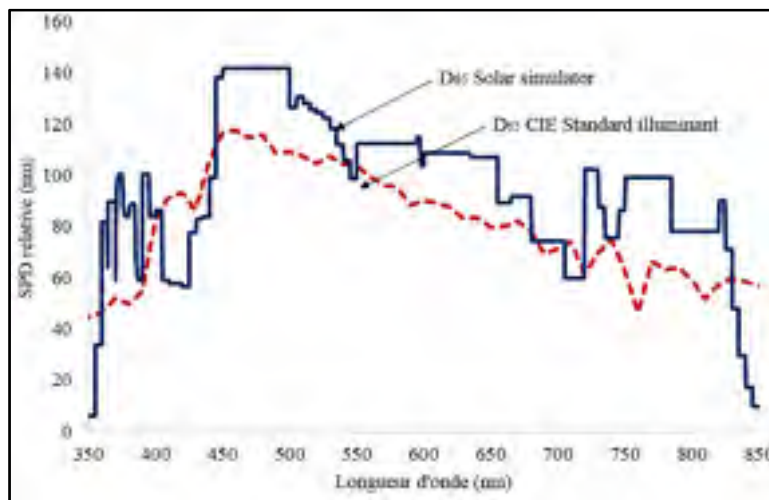


Figure 6.21 Profil spectral lissé de la SPD du simulateur D_{65} à quatorze DELs en tenant compte des ellipses de MacAdam comparé à celui de la SPD de l'illuminant D_{65} .

6.2.4.2 Non-uniformité spatiale de l'irradiance

Après avoir effectué les mesures des données colorimétriques et spectrales du simulateur D₆₅ à quatorze DELs, on reprend la même procédure de calibration de la section 6.2.3.1 en conservant les mêmes paramètres d'acquisition pour l'évaluation de la non-uniformité spatiale de l'irradiance sur une surface test distante de 10 cm du simulateur solaire. Les résultats obtenus sont présentés à la figure 6.22.

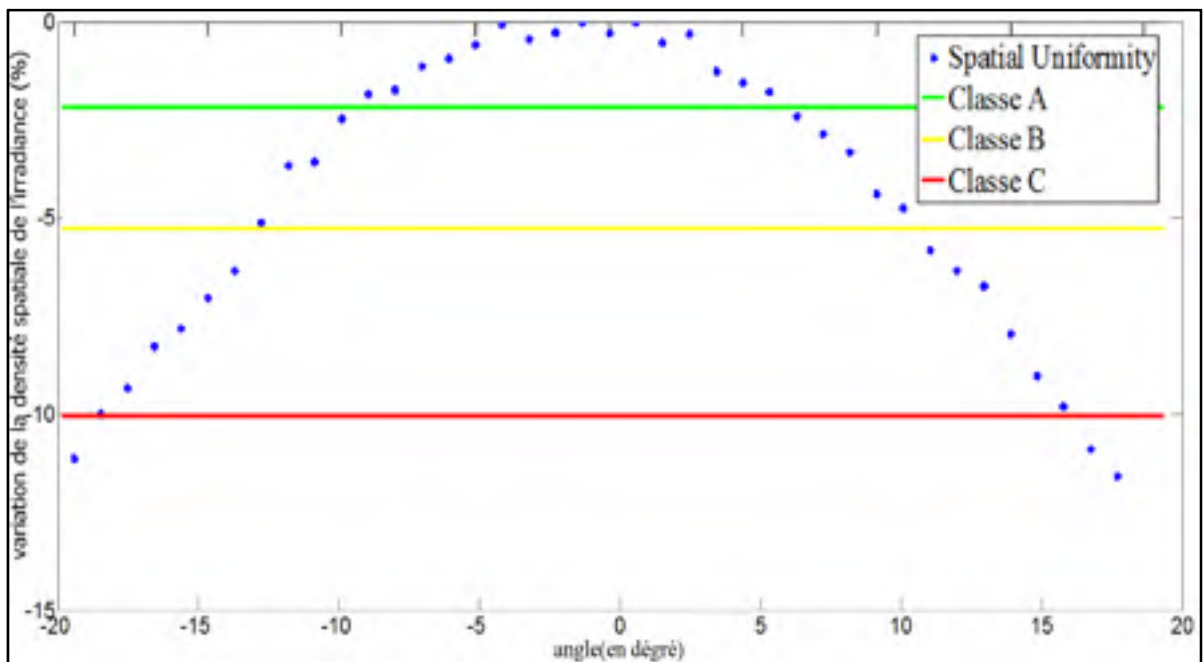


Figure 6.22 Non-uniformité spatiale de l'irradiance du simulateur solaire D₆₅ à quatorze DELs sur une surface test située à 10 cm

La détermination de la section de surface test illuminée par le simulateur solaire de **classe AAA** se fait selon le même principe utilisé dans le cas du simulateur solaire à douze DELs. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 6.5.

Tableau 6.5 Classe du simulateur solaire D₆₅ à quatorze DELs du point de vue uniformité spatiale de l'irradiance en fonction de l'aire d'une surface teste distante de 10 cm

| Distance (cm) | 10 | | |
|-------------------------------|-------|--------|--------|
| Classe | A | B | C |
| θ (°) | 08.10 | 12.30 | 18.00 |
| S_{Test} (cm ²) | 6.363 | 13.592 | 27.125 |

Nous pouvons remarquer qu'à 10 cm du simulateur, les aires des sections de surface correspondant aux classes A, B et C selon la non-uniformité spatiale de l'irradiance sont pratiquement voisines de celles obtenues sous illumination par le simulateur solaire à douze DELs dans les mêmes conditions. Cela peut paraître logique dans la mesure où les axes des faisceaux de toutes les DELs convergent à une distance voisine de 10 cm du simulateur, la contribution spectrale de chacune d'elles se fait de manière quasi-uniforme sur une surface test située au voisinage de ce point de concourt. Les surfaces test distantes de 10 cm sous illumination par les simulateurs solaires à douze et à quatorze DELs de **classe AAA** sont respectivement 5.445 cm² et 6.363 cm², soit une augmentation d'aire de l'ordre de 16.86 %.

6.2.4.3 Évaluation de l'instabilité temporelle de l'irradiance

L'évaluation de l'instabilité temporelle de l'irradiance se fait selon le même procédé utilisé pour le simulateur solaire à douze DELs. La figure 6.23 donne le résultat obtenu déterminé par rapport au standard G927 E-10 de l'ASTM. La valeur de 0.516% d'instabilité temporelle renforce la **classe A** de notre simulateur solaire D₆₅ par rapport à ce critère de performance.

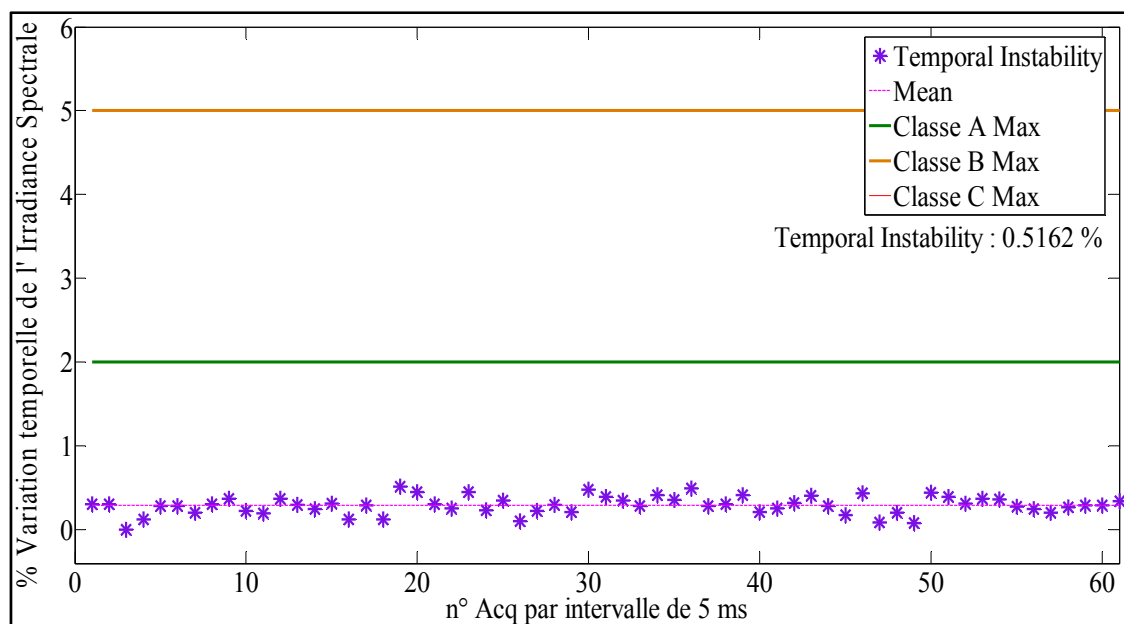


Figure 6.23 Instabilité temporelle de l'irradiance du simulateur solaire D₆₅ à quatorze DELs mesurée sur un intervalle de temps de 300 s par pas de 5 ms

6.2.4.4 Paramètres calibrations du simulateur solaire

Les paramètres d'acquisition des données de caractérisation du simulateur par SpectraSuite sont primordiaux pour la reproductibilité des résultats. Cependant, les caractéristiques du simulateur demeurent très sensibles aux fluctuations des courants d'alimentation des DELs (l'équilibre du circuit d'alimentation est perdu chaque fois qu'on ajoute ou retire une ou plusieurs DELs) et à la disposition de ces dernières sur le bouchon support. Le changement de la position d'une DEL sur le bouchon peut fortement modifier sa contribution en irradiance et de facto, modifier considérablement les caractéristiques colorimétriques et spectrales du simulateur solaire. Ces limitations peuvent être dues aux erreurs de fabrication sur les dimensions des DELs et des trous du support des DELs. Par conséquent, la contribution en puissance de chaque composante DEL du simulateur solaire reste le paramètre fiable pour la reproductibilité des résultats. Le tableau 6.6 donne la puissance totale du simulateur solaire à quatorze DELs réalisé ainsi que la contribution en puissance de chacune de ses composantes DELs.

Tableau 6.6 Puissance optique totale P_{opt} du simulateur solaire à quatorze DELs et la contribution en puissance (en %) de chacune de ses composantes DELs

| N° | Led365 | Led400 | Led425 | Led505 | Led535 | Led589 | Led627 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| P_{op} (mW) | 2.65 | 2.64 | 1.50 | 3.33 | 1.73 | 1.91 | 0.932 |
| <i>Puissance totale du simulateur D65 à quatorze LEDs - Puissance totale du - -</i> | | | | | | | |
| % | 4.69 | 4.67 | 2.65 | 5.89 | 2.75 | 3.06 | 1.65 |

| N° | Led640 | Led680 | Led720 | Led760 | Led780 | Led820 | Led-W |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| P_{op} (mW) | 1.94 | 3.25 | 3.03 | 2.82 | 3.25 | 4.36 | 23.20 |
| <i>- - simulateur D65 à quatorze LEDs (mW)</i> | | | | | | 56.542 | |
| % | 3.43 | 5.75 | 5.36 | 4.99 | 5.75 | 7.71 | 41.03 |

6.2.4.5 Contribution spectrale de la DEL W54L5111

Compte tenu du domaine spectral couvert par la DEL blanche, il est intéressant de se faire une idée de son poids sur le profil spectral du simulateur solaire D₆₅ à quatorze DELs. La figure 6.24 donne le profil spectral ainsi que les caractéristiques colorimétriques de son rayonnement lumineux sous un courant d'alimentation de 0.31 mA. On remarque une forte contribution spectrale de la part de cette DEL au niveau de la SPD du simulateur, Cependant, son diagramme de rayonnement assez étroit peut pénaliser l'uniformité de la distribution spatiale de la puissance de ce dernier sur une surface test. Quant à son utilisation à forte intensité pour augmenter la puissance du simulateur, on note une dérive de la TCP vers de très grandes valeurs due à la forte radiation bleue autour de 465 nm; ce qui rend très délicat l'optimisation du simulateur.

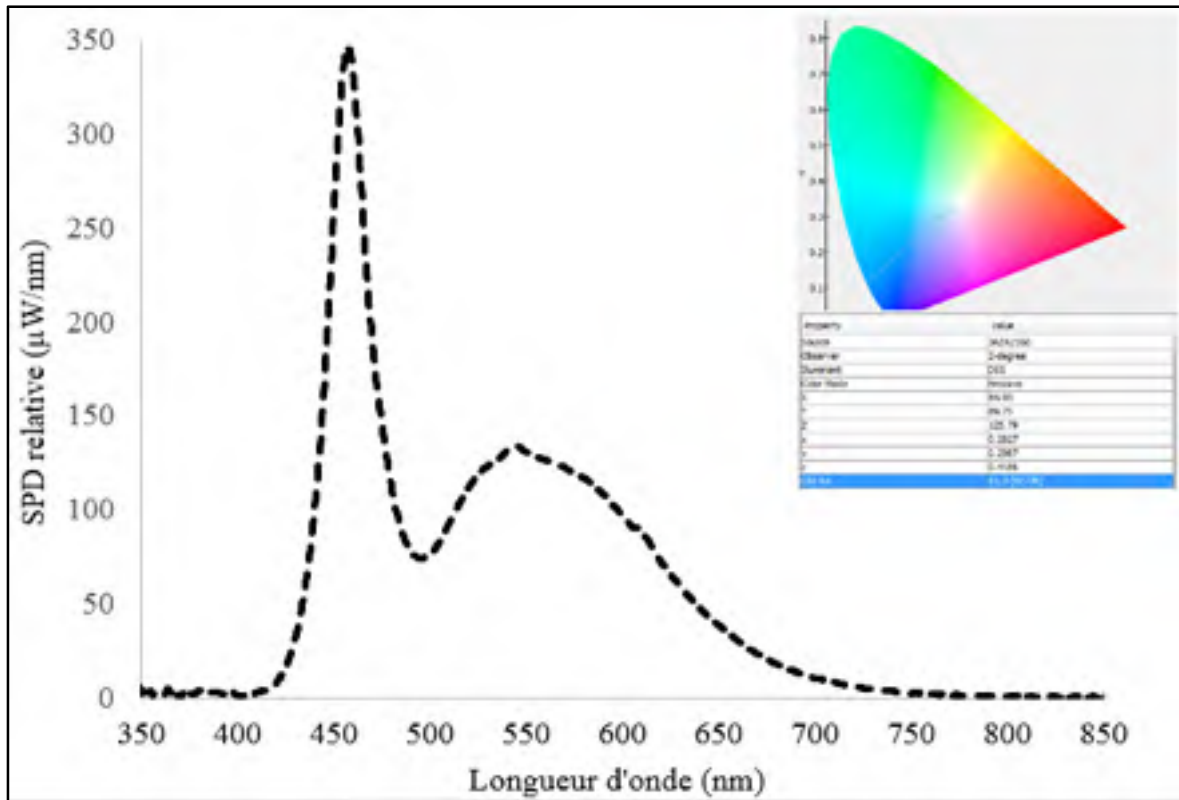


Figure 6.24 Contribution en SPD de la DEL W54L5111P sous une alimentation d'un courant de 0.31 mA et à la température de la salle dans la SPD du simulateur solaire D₆₅ à quatorze DELs

6.2.4.6 Mesure de densité de puissance sur une surface test distante de 10 cm du simulateur solaire D₆₅

Après l'optimisation et la caractérisation du simulateur D₆₅ via SpectraSuite, il est nécessaire d'évaluer directement sa densité de puissance sur une surface test illuminée. Ces mesures sont effectuées sur une surface test distante de 10 cm du simulateur en utilisant le détecteur au silicium 818 SL de Thorlabs comme l'illustre la photo présentée à la figure 6.25. Ce détecteur a une couverture spectrale de 400 nm à 1100 nm et une surface active de 1 cm². Nous avons fixé la longueur d'onde centrale du détecteur à $\lambda = 600 \text{ nm}$ par le simple fait qu'elle correspond au centre du domaine spectral du simulateur solaire D₆₅. Vues les dimensions de la source par rapport à la surface active du détecteur, nous avons procédé à des prises de mesures par pas de 0.50 cm sur l'axe horizontal puis vertical du rayonnement du simulateur de part et d'autre d'une position centrale correspondant à la puissance

maximale mesurée sur la surface test. La moyenne des densités de puissance mesurées aux quatre positions équivalentes r_i de part et d'autres de la position correspondant à la densité maximale équivaut à la densité spatiale de puissance sur la section de surface $S_{r_i-0.5 \rightarrow r_i}$ exprimé en cm^2 comprise entre les circonférences consécutives de rayon $r_i - 0.5$ et r_i . Le détecteur ayant une surface active circulaire de 1 cm^2 , le rayon varie par pas de 0.5 cm entre 0.564 cm et 3.060 cm avec comme limite inférieure le rayon de la surface active du détecteur et la limite supérieure est fixée par des contraintes mécaniques liées au dispositif expérimental. La densité spatiale de puissance maximale mesurée à l'origine est obtenue sur une surface circulaire (surface active du détecteur) de rayon $r_1 = 0.564 \text{ cm}$. Les valeurs des densités de puissances mesurées pour différentes valeurs r_i sont indiquées au tableau 6.7. La densité spatiale de puissance D_{r_i} sur chaque portion de surface test comprise entre les rayons $r_i - 0.5$ et r_i est donnée par l'équation 6.3 et la figure 6.26 donne les variations de densités spatiales de puissance en fonction de la position sur la surface test et de la distance qui la sépare du simulateur solaire.

$$D_{r_i} = D_{r_i-0.5 \rightarrow r_i} = \frac{P_{r_i-0.5} - P_{r_i}}{S_{r_i} - S_{r_i-0.5}} \quad (6.3)$$

Avec

P_{r_i} : puissance en milliwatts lue au niveau du détecteur à la position r_i

$P_{r_i-0.5}$: puissance en milliwatts lue au niveau du détecteur à la position $r_i - 0.5 \text{ cm}$

S_{r_i} : aire en centimètres carrés de la surface test de rayon r_i

$S_{r_i-0.5}$: aire en centimètres carrés de la surface test de rayon $r_i - 0.5 \text{ cm}$

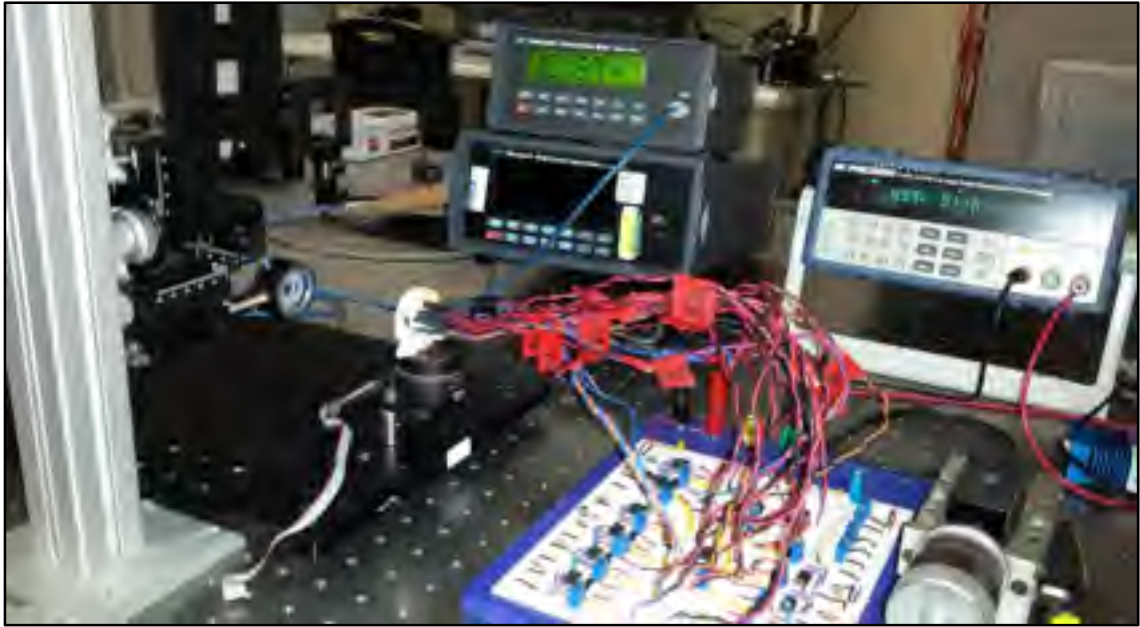


Figure 6.25 Montage de la mesure de la densité spatiale de puissance du simulateur solaire à quatorze DELs sur une surface test distante de 10 cm

Tableau 6.7 Densité spatiale de puissance du simulateur solaire D₆₅ à quatorze DELs sur différentes sections de surface en fonction du rayon d'illumination d'une surface test distante de 10 cm

| Rayon (cm) | Section de Srsurface (cm ²) | Densité de puissance sur distante de 10 cm (mW.cm ⁻²) |
|---------------|---|---|
| 0.000 | 0.000 | 1.020 |
| 0.000 - 0.564 | 1,000 | 1.020 |
| 0.564 - 1.060 | 2,530 | 0.959 |
| 1.060 - 1.620 | 5,745 | 0.802 |
| 1.620 - 2.180 | 9,185 | 0.590 |
| 2.180 - 2.640 | 12,710 | 0.361 |
| 2.640 - 3.060 | 16,707 | 0.195 |

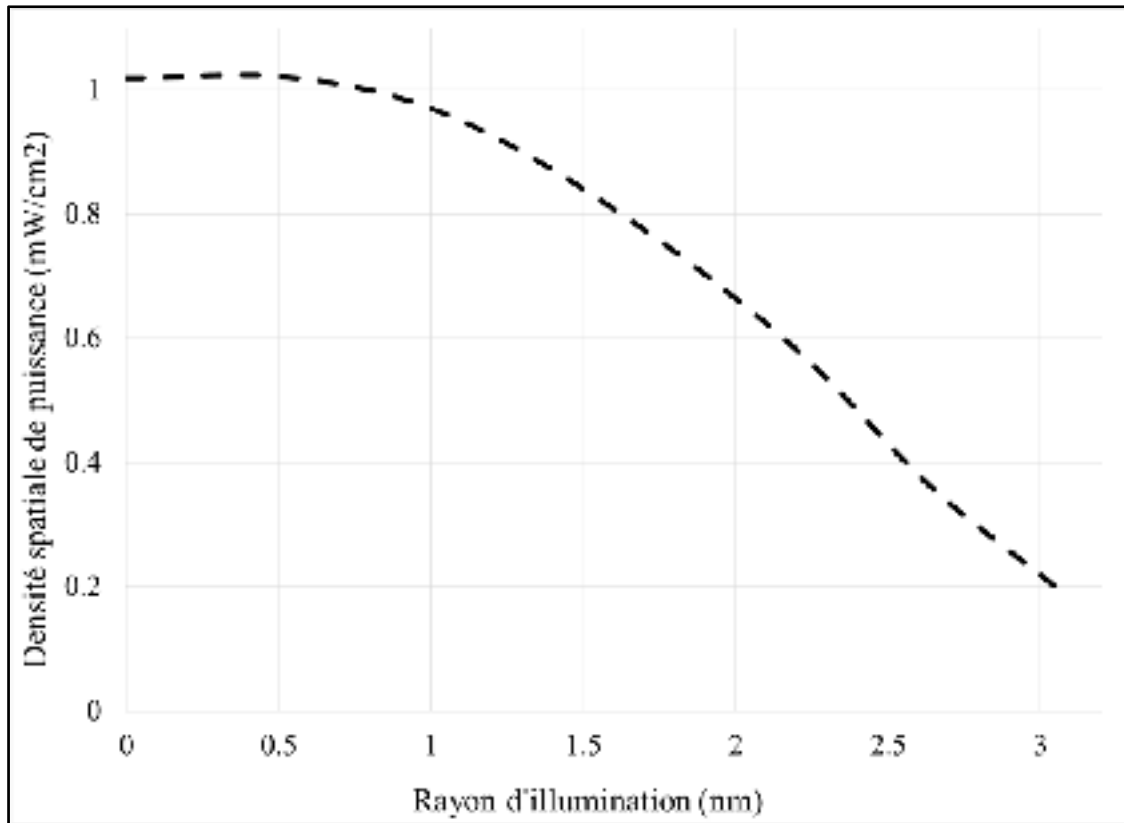


Figure 6.26 Variation de la densité spatiale de puissance du simulateur D₆₅ à quatorze DELs en fonction du rayon d'illumination (r_i) sur une surface test distante de 10 cm

En considérant la surface test distante de $d = 10$ cm du simulateur, la densité puissance maximale indiquée à l'origine par le détecteur est $D_{max} = 1.02 \text{ mW/cm}^2$. A la circonférence de la surface illuminée sous le cône de demi-angle au sommet $\theta(A) = 8.10$ degrés ($r_\theta(A) = 1.423 \text{ cm}$) correspondant à la section de surface test distante de 10 cm sous illumination par le simulateur à quatorze DELs de **classe AAA**, la densité spatiale de puissance est de 0.802 mW/cm^2 . Ceci équivaut à une variation de la densité spatiale de puissance par rapport à la position $r_1 = 0.564$ de l'ordre de 21.40%. La différence de cette valeur à celle de 25 % trouvée à la section 6.24.2 pour la même section de surface test selon ce critère de performance pourrait s'expliquer par le fait que le profil de la réponse spectrale du détecteur 818 SL ne soit pas le même que celui du spectromètre sur le domaine spectral du simulateur solaire. De plus, la longueur d'onde centrale que nous avons appelée à $\lambda = 600 \text{ nm}$ peut ne pas être celle qui correspond à la meilleure sensibilité du détecteur vis-à-vis de l'irradiance spectrale du simulateur solaire. Ces limitations peuvent être à l'origine des

différences notées au niveau de la variation de la densité spatiale de puissance sur la surface test distante de 10 cm du simulateur solaire. En valeur moyenne, la section de surface test distante de 10 cm sous illumination par le simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs de **classe AAA** reçoit une densité spatiale de puissance de 0.927 mW/cm^2 . Cette valeur de est de l'ordre du centième de la valeur standard (100 mW/cm^2) idéale pour la caractérisation de cellules solaires photovoltaïques; cependant, cette limitation n'est qu'une question d'ingénierie!

6.2.4.7 Position du simulateur par rapport aux loci de Planck et des phases de la lumière naturelle du jour dans le système CIE (u, v) 1960

A partir des coordonnées de chromaticité (x, y) d'une source dans le système CIE (x, y) 1931, on peut déduire ceux (u, v) et (u', v') des systèmes de coordonnées respectifs CIE (u, v) 1960 et CIE (u', v') 1976 à partir des équations de transfert 6.4 et 6.5.

$$u' = u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad (6.4)$$

$$v' = \frac{3}{2}v = \frac{9x}{-2x + 12y + 3} \quad (6.5)$$

Le tableau donne les coordonnées de chromaticité u et v du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs et la figure 6.27 indique la position du simulateur solaire D_{65} à quatorze DELs par rapport aux loci de Planck et des phases de la lumière naturelle du jour dans le système de coordonnées CIE (u, v) 1960.

Tableau 6.8 Coordonnées de chromaticité du simulateur solaire à quatorze DELs comparées à celles de l'illuminant normalisé D_{65} dans les systèmes CIE (x, y) 1931 et CIE (u, v) 1960

| Type de source | CIE (x, y) 1931 | | CIE (u, v) 1960 | |
|---------------------|-----------------|--------|-----------------|-------|
| | x | y | u | v |
| D_{65} Illuminant | 0.3127 | 0.3290 | 0.198 | 0.312 |

| | | | | |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Simulateur solaire D ₆₅ | 0.312 | 0.333 | 0.196 | 0.313 |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|

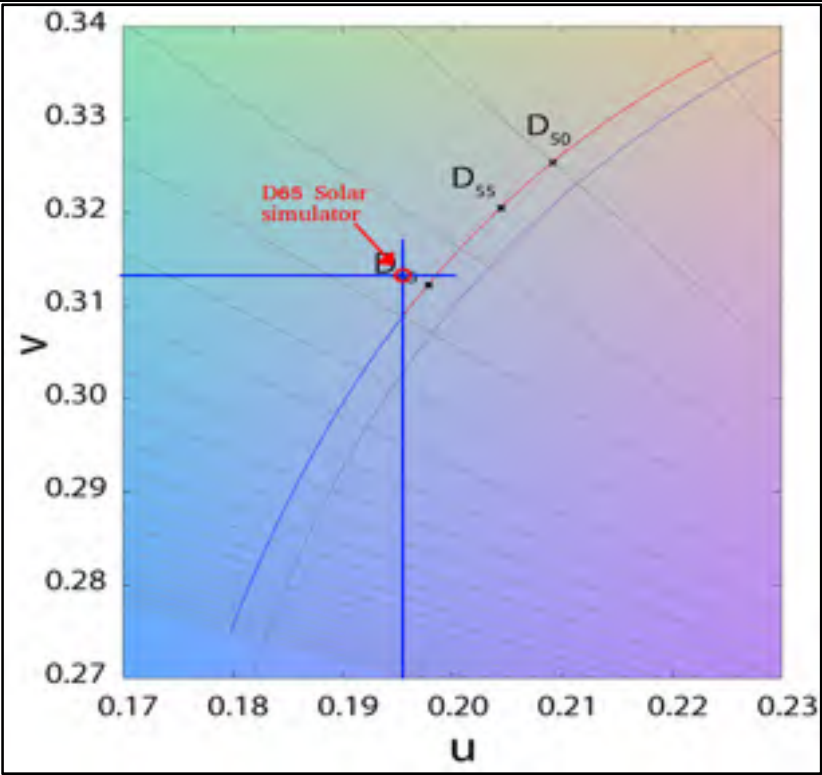


Figure 6.27 Position du simulateur solaire D₆₅ à quatorze DELs par rapport aux loci de Planck et des phases de la lumière naturelle du jour dans le système CIE (u, v) 1960
Adaptée de Wikipédia (2014)

Le calcul de la distance séparant la position de l'illuminant D₆₅ à celle du simulateur en utilisant l'équation 3.1 adaptée au système de coordonnées CIE (u, v) 1960 est de l'ordre de 0.4×10^{-2} ; une valeur nettement inférieure au seuil 5×10^{-2} recommandée par la CIE pour que le simulateur solaire D₆₅ à quatorze DELs puisse être comparable au radiateur de Planck ayant une température de couleur de 6504 K.

CONCLUSION

Les efforts consentis dans ce travail ont eu comme objectif la réalisation d'un simulateur solaire D_{65} à partir d'un assemblage de DELs de forme broche pour des applications en photovoltaïque. Pour ce type d'applications, les caractéristiques essentielles d'un simulateur solaire sont l'énergie, le match de l'irradiance spectrale par rapport à un standard défini, l'uniformité spatiale de l'irradiance et la stabilité temporelle de l'irradiance sur une surface test. La majorité des systèmes photovoltaïques ont comme constituant de base le silicium; les données standard définies pour la caractérisation des simulateurs solaires sont souvent établies en se basant sur les propriétés physiques du silicium telles que son énergie de bande interdite et son coefficient d'absorption.

Le marché du photovoltaïque dispose de simulateurs solaires performants mais leurs caractéristiques (coût, poids et dimensions) demeurent des facteurs limitants pour leur utilisation à grande échelle. En associant treize DELs de couleurs et une DEL blanche, on a pu réaliser un simulateur solaire D_{65} de **classe AAA** par rapport aux critères de performance que sont le "*match spectral*", la stabilité temporelle et l'uniformité spatiale de l'irradiance spectrale sur une surface test de 6.363 cm^2 distante de 10 cm du simulateur et sur le domaine spectral 350 nm - 900 nm. Le grand intérêt de ce travail est surtout le faible coût de réalisation et la portabilité du simulateur solaire réalisé qui sont des éléments essentiels pour la rentabilité et l'utilisation à grande échelle. La grande stabilité du rayonnement et la longue durée de vie de ses composantes DELs, surtout lorsque celles-ci sont alimentées par de faibles courants, confèrent au simulateur solaire D_{65} réalisé une place de choix dans les applications nécessitant une grande stabilité spectrale. Aussi, ces résultats ouvrent des bonnes perspectives à la miniaturisation et la réduction des coûts des simulateurs solaires dans le marché photovoltaïque. La commercialisation de ce produit pourrait contribuer favorablement à une utilisation plus flexible des simulateurs solaires aussi bien au sein des laboratoires de recherche que dans l'industrie photovoltaïque. L'avantage de la méthode est d'éviter l'utilisation des luminophores et de permettre le bon contrôle dynamique l'irradiance spectrale.

Les données standard relatives à la caractérisation d'un simulateur solaire sont généralement établies sur le domaine spectral 400 nm - 1100nm. La limitation de la couverture spectrale du simulateur solaire D₆₅ réalisé entre 350 nm et 900 nm est liée à trois contraintes majeures:

- la couche de protection en plastique des puces des DELs en forme broche ne transmettent pas au-dessous de 350 nm;
- les bandes spectrales du spectromètre Jaz et de la source de calibration LC-1-CAL s'étendent respectivement de 350 nm à 1000 nm et 350 nm à 1100 nm avec un signal très bruité au-delà 900 nm;
- le nombre maximal de DELs pouvant être utilisé pour la réalisation du simulateur solaire D₆₅ est limité par la capacité du bouchon support à l'orifice de la sphère intégratrice.

Cependant, l'énergie contenue dans le domaine visible (380 nm - 780 nm) est suffisante pour garantir un fonctionnement optimal d'un système photovoltaïque à base de silicium (Honsberg and Bowden, 2013); ce qui nous rend confortables dans le domaine spectral de notre simulateur solaire D₆₅.

Le défaut majeur de la technologie réside au niveau du contrôle individuel de chacune des quatorze DELs élémentaires qui constituent le simulateur D₆₅. Il faut aussi prendre en compte le fait que les diodes de chaque couleur élémentaire nécessitent une tension d'alimentation différente. Une conséquence directe de ces défauts est que: comparée à une lampe classique de même flux lumineux, la surface de la source composite est considérable. Les quatorze DELs émettent dans des cônes de rayonnement différents, d'où la forte sensibilité de l'uniformité spatiale de l'irradiance du simulateur solaire à la position de chaque DEL sur le support. Aussi, les DELs sont fixées sur le bouchon en plastique de telle sorte que tous les axes de leurs diagrammes de rayonnement concourent au centre du fond de la sphère intégratrice situé à environ 8.5 cm; si toutes les DELs avaient des cônes de rayonnement identiques, l'uniformité spatiale de l'irradiance serait optimale sur une surface test distante de 8.5 cm du simulateur solaire D₆₅, ce qui simplifierait fortement la caractérisation du point de vue spectral. Un choix rigoureux du profil des diagrammes de rayonnement des différentes DELs composant le simulateur D₆₅ pourrait être un moyen efficace pour l'amélioration de ses performances.

ANNEXE I

SPÉCIFICITÉS DES ILLUMINANTS FLUORESCENTS STANDARDS

Tableau-A I-1 Illuminants fluorescents standards

| Illuminant CIE | Coordonnée x | Coordonnée y | Température couleur (K) | IRC | dénomination usuelle |
|-------------------|-----------------|-----------------|----------------------------|-----|-------------------------|
| F1 | 0,3131 | 0,3371 | 6430 | 76 | <i>Daylight</i> |
| F2 | 0,3721 | 0,3751 | 4230 | 64 | <i>Cool White</i> |
| F3 | 0,4091 | 0,3941 | 3450 | 57 | <i>White</i> |
| F4 | 0,4402 | 0,4031 | 2940 | 51 | <i>Warm White</i> |
| F5 | 0,3138 | 0,3452 | 6350 | 72 | <i>Daylight</i> |
| F6 | 0,3779 | 0,3882 | 4150 | 59 | <i>Lite White</i> |

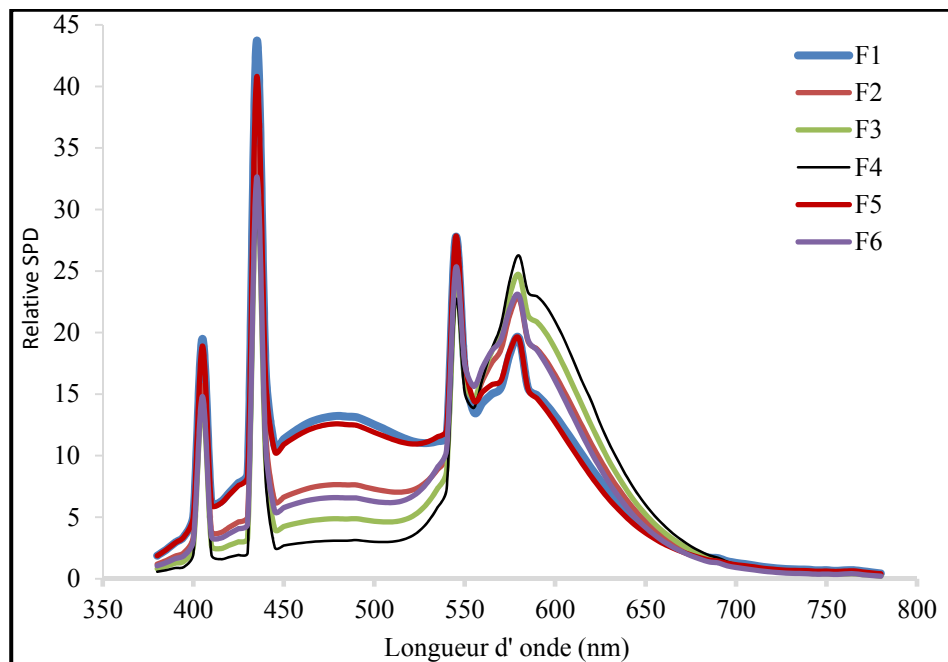


Figure-A I-1 Spectres des illuminants fluorescents standards

Tableau-A I-2 Illuminants fluorescents à large bande

| Illuminant CIE | Coordonnée x | Coordonnée y | Température couleur (K) | IRC | dénomination usuelle |
|-------------------|-----------------|-----------------|----------------------------|-----|---|
| F7 | 0,3129 | 0,3292 | 6500 | 90 | D65 <i>Daylight</i> |
| F8 | 0,3458 | 0,3586 | 5000 | 95 | D50 Sylvania F40 <i>design</i> 50 |
| F9 | 0,3741 | 0,3727 | 4150 | 90 | <i>Cool White</i> <i>Deluxe</i> |

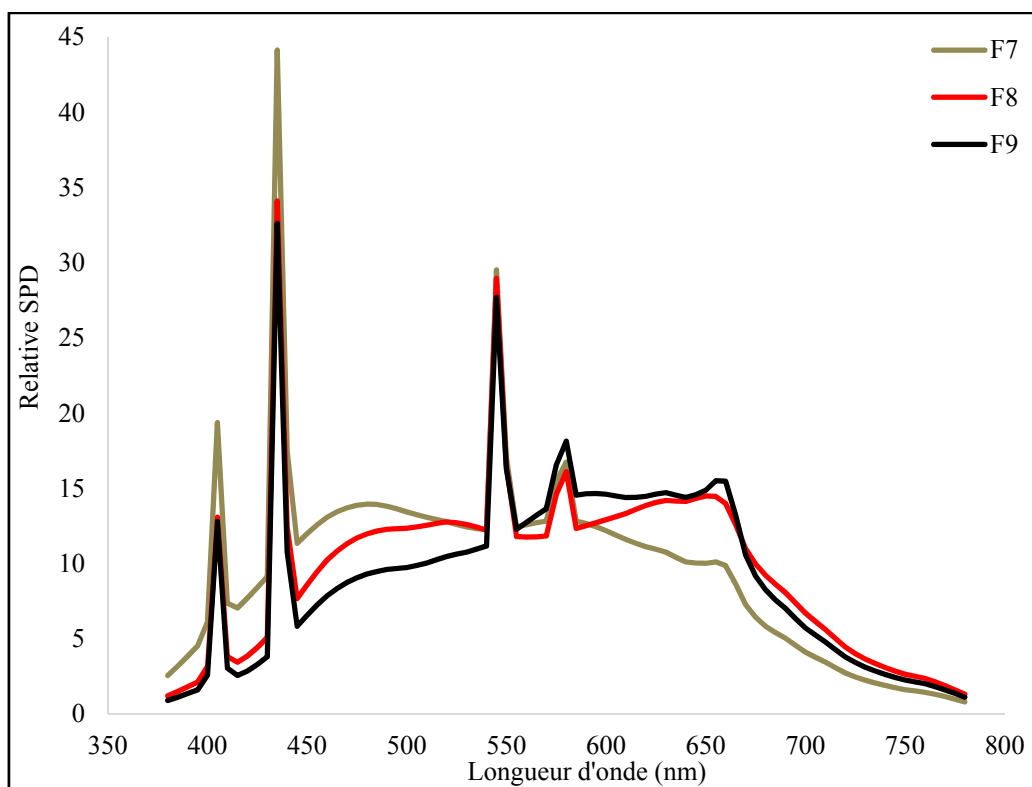


Figure-A I-2 Spectres des illuminants fluorescents à bande large

Tableau-A I-3 Illuminants fluorescents à bande étroite

| Illuminant CIE | Coordonnée x | Coordonnée y | Température couleur (K) | IRC | dénomination usuelle |
|-------------------|-----------------|-----------------|----------------------------|-----|------------------------------|
| F10 | 0,3458 | 0,3588 | 5000 | 81 | TL85 Ultralume 50 |
| F11 | 0,3805 | 0,3769 | 4000 | 83 | TL84 SP41 Ultralume 40 |
| F12 | 0,4370 | 0,4042 | 3000 | 83 | TL83 Ultralume 30 |

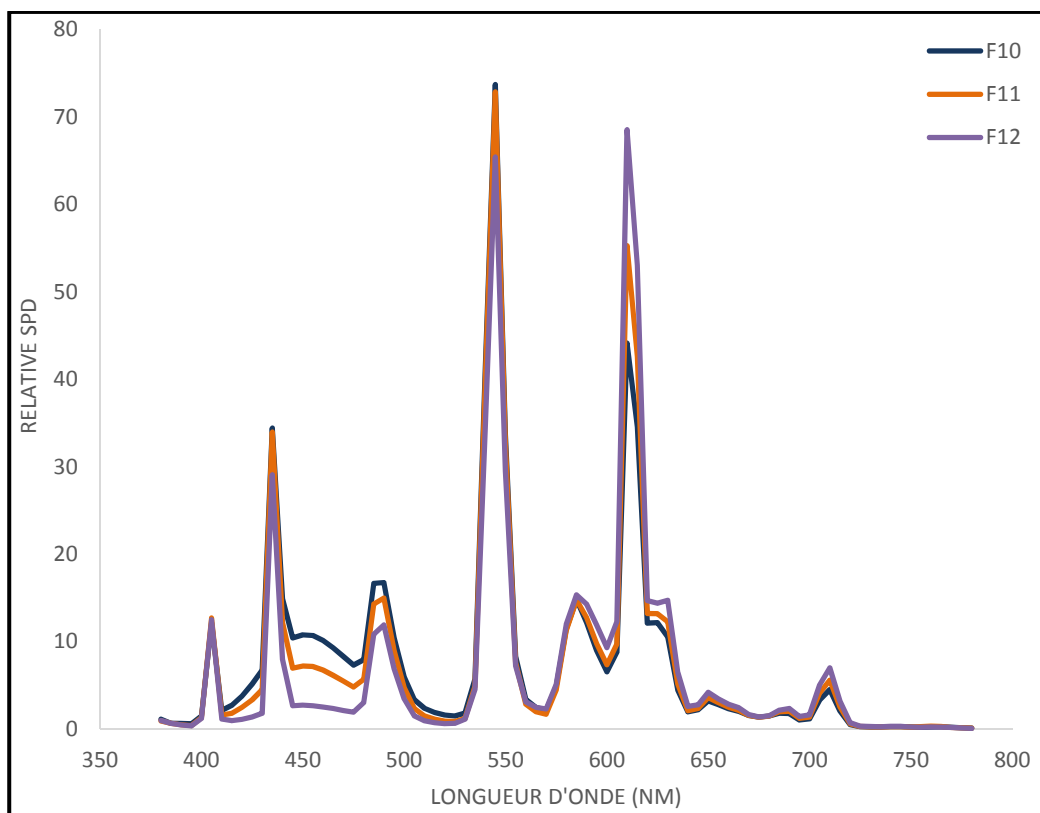


Figure-A I-3 Spectres des illuminants fluorescents à bande étroite

ANNEXE II

LOWESS SMOOTHED $S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$ AND $S_2(\lambda)$ EIGENVECTOR

| Wavelength / nm | $S_{0,s}(\lambda)$ | $S_{1,s}(\lambda)$ | $S_{2,s}(\lambda)$ |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 300 | 0.914218 | 0.348648 | 0.310987 |
| 301 | 2.499837 | 1.640810 | 0.588797 |
| 302 | 4.066354 | 2.913151 | 0.860926 |
| 303 | 5.613333 | 4.165049 | 1.127100 |
| 304 | 7.140340 | 5.395878 | 1.387041 |
| 305 | 8.646938 | 6.605017 | 1.640475 |
| 306 | 10.132690 | 7.791841 | 1.887125 |
| 307 | 11.597170 | 8.955728 | 2.126716 |
| 308 | 13.039930 | 10.096050 | 2.358970 |
| 309 | 14.460530 | 11.212190 | 2.583612 |
| 310 | 15.858560 | 12.303530 | 2.800366 |
| 311 | 17.236210 | 13.373980 | 3.011224 |
| 312 | 18.595840 | 14.427300 | 3.217988 |
| 313 | 19.937160 | 15.462600 | 3.420096 |
| 314 | 21.259900 | 16.479000 | 3.616987 |
| 315 | 22.563800 | 17.475610 | 3.808101 |
| 316 | 23.848580 | 18.451550 | 3.992875 |
| 317 | 25.113970 | 19.405930 | 4.170750 |
| 318 | 26.359700 | 20.337870 | 4.341163 |
| 319 | 27.585490 | 21.246470 | 4.503555 |
| 320 | 28.791080 | 22.130860 | 4.657362 |
| 321 | 29.978260 | 22.995440 | 4.805441 |
| 322 | 31.148920 | 23.844580 | 4.950487 |
| 323 | 32.302930 | 24.677310 | 5.091705 |
| 324 | 33.440170 | 25.492700 | 5.228296 |
| 325 | 34.560510 | 26.289800 | 5.359465 |
| 326 | 35.663810 | 27.067640 | 5.484414 |
| 327 | 36.749960 | 27.825300 | 5.602348 |
| 328 | 37.818820 | 28.561810 | 5.712468 |
| 329 | 38.870260 | 29.276220 | 5.813979 |
| 330 | 39.904160 | 29.967590 | 5.906083 |
| 331 | 40.922530 | 30.641390 | 5.993827 |
| 332 | 41.927160 | 31.302730 | 6.081620 |
| 333 | 42.917610 | 31.950120 | 6.167707 |
| 334 | 43.893450 | 32.582060 | 6.250334 |
| 335 | 44.854230 | 33.197070 | 6.327748 |
| 336 | 45.799530 | 33.793650 | 6.398194 |
| 337 | 46.728890 | 34.370300 | 6.459918 |
| 338 | 47.641880 | 34.925550 | 6.511166 |
| 339 | 48.538050 | 35.457890 | 6.550185 |
| 340 | 49.416990 | 35.965840 | 6.575220 |

| Wavelength / nm | $S_{0,s}(\lambda)$ | $S_{1,s}(\lambda)$ | $S_{2,s}(\lambda)$ |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 341 | 50.283680 | 36.459530 | 6.592172 |
| 342 | 51.141950 | 36.947510 | 6.608006 |
| 343 | 51.989550 | 37.425930 | 6.622567 |
| 344 | 52.824230 | 37.890920 | 6.635695 |
| 345 | 53.643720 | 38.338640 | 6.647236 |
| 346 | 54.445800 | 38.765230 | 6.657030 |
| 347 | 55.228190 | 39.166840 | 6.664921 |
| 348 | 55.988670 | 39.539600 | 6.670752 |
| 349 | 56.724970 | 39.879660 | 6.674366 |
| 350 | 57.434840 | 40.183160 | 6.675606 |
| 351 | 58.136650 | 40.473080 | 6.667687 |
| 352 | 58.844030 | 40.769190 | 6.645094 |
| 353 | 59.547630 | 41.062830 | 6.609578 |
| 354 | 60.238110 | 41.345380 | 6.562885 |
| 355 | 60.906120 | 41.608180 | 6.506767 |
| 356 | 61.542330 | 41.842580 | 6.442970 |
| 357 | 62.137390 | 42.039940 | 6.373244 |
| 358 | 62.681950 | 42.191620 | 6.299337 |
| 359 | 63.166680 | 42.288960 | 6.222999 |
| 360 | 63.582230 | 42.323330 | 6.145978 |
| 361 | 63.932490 | 42.298560 | 6.058499 |
| 362 | 64.235180 | 42.230550 | 5.951588 |
| 363 | 64.501670 | 42.128730 | 5.828196 |
| 364 | 64.743340 | 42.002560 | 5.691272 |
| 365 | 64.971580 | 41.861480 | 5.543767 |
| 366 | 65.197770 | 41.714940 | 5.388630 |
| 367 | 65.433290 | 41.572380 | 5.228810 |
| 368 | 65.689530 | 41.443250 | 5.067260 |
| 369 | 65.977850 | 41.337000 | 4.906927 |
| 370 | 66.309650 | 41.263060 | 4.750762 |
| 371 | 66.690330 | 41.208510 | 4.593285 |
| 372 | 67.114480 | 41.154880 | 4.428262 |
| 373 | 67.577220 | 41.103290 | 4.257513 |
| 374 | 68.073720 | 41.054090 | 4.082856 |
| 375 | 68.599100 | 41.010820 | 3.906112 |
| 376 | 69.148530 | 40.972220 | 3.729100 |
| 377 | 69.717130 | 40.940210 | 3.553639 |
| 378 | 70.300060 | 40.915930 | 3.381550 |
| 379 | 70.892460 | 40.900540 | 3.214650 |
| 380 | 71.489480 | 40.895150 | 3.054760 |
| 381 | 72.105000 | 40.907560 | 2.900089 |
| 382 | 72.753070 | 40.942200 | 2.747662 |
| 383 | 73.429070 | 40.995240 | 2.597524 |

| Wavelength / nm | $S_{0,s}(\lambda)$ | $S_{1,s}(\lambda)$ | $S_{2,s}(\lambda)$ |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 384 | 74.128360 | 41.062810 | 2.449719 |
| 385 | 74.846300 | 41.141070 | 2.304291 |
| 386 | 75.578260 | 41.226160 | 2.161284 |
| 387 | 76.319610 | 41.314230 | 2.020744 |
| 388 | 77.065720 | 41.401420 | 1.882714 |
| 389 | 77.811950 | 41.483890 | 1.747239 |
| 390 | 78.553670 | 41.557770 | 1.614364 |
| 391 | 79.295320 | 41.629250 | 1.483952 |
| 392 | 80.044310 | 41.705750 | 1.355796 |
| 393 | 80.800440 | 41.785310 | 1.229826 |
| 394 | 81.563530 | 41.865950 | 1.105978 |
| 395 | 82.333380 | 41.945730 | 0.984181 |
| 396 | 83.109790 | 42.022660 | 0.864371 |
| 397 | 83.892580 | 42.094800 | 0.746478 |
| 398 | 84.681550 | 42.160170 | 0.630436 |
| 399 | 85.476510 | 42.216810 | 0.516178 |
| 400 | 86.277270 | 42.262750 | 0.403635 |
| 401 | 87.086070 | 42.302910 | 0.292077 |
| 402 | 87.904470 | 42.342850 | 0.181106 |
| 403 | 88.731270 | 42.381650 | 0.071158 |
| 404 | 89.565240 | 42.418350 | -0.037330 |
| 405 | 90.405180 | 42.452000 | -0.143920 |
| 406 | 91.249860 | 42.481660 | -0.248190 |
| 407 | 92.098090 | 42.506370 | -0.349690 |
| 408 | 92.948650 | 42.525200 | -0.447980 |
| 409 | 93.800320 | 42.537190 | -0.542640 |
| 410 | 94.651890 | 42.541390 | -0.633220 |
| 411 | 95.511020 | 42.537510 | -0.721090 |
| 412 | 96.383270 | 42.526320 | -0.807620 |
| 413 | 97.264210 | 42.508510 | -0.892410 |
| 414 | 98.149440 | 42.484760 | -0.975060 |
| 415 | 99.034550 | 42.455760 | -1.055180 |
| 416 | 99.915140 | 42.422190 | -1.132350 |
| 417 | 100.786800 | 42.384730 | -1.206190 |
| 418 | 101.645100 | 42.344070 | -1.276290 |
| 419 | 102.485700 | 42.300900 | -1.342260 |
| 420 | 103.304100 | 42.255900 | -1.403680 |
| 421 | 104.112700 | 42.200770 | -1.461200 |
| 422 | 104.923200 | 42.127910 | -1.515880 |
| 423 | 105.730300 | 42.039040 | -1.567980 |
| 424 | 106.528800 | 41.935860 | -1.617750 |
| 425 | 107.313500 | 41.820090 | -1.665460 |
| 426 | 108.079100 | 41.693450 | -1.711360 |

| Wavelength / nm | $S_{0,s}(\lambda)$ | $S_{1,s}(\lambda)$ | $S_{2,s}(\lambda)$ |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 427 | 108.820300 | 41.557630 | -1.755710 |
| 428 | 109.532000 | 41.414360 | -1.798770 |
| 429 | 110.208900 | 41.265350 | -1.840800 |
| 430 | 110.845700 | 41.112310 | -1.882050 |
| 431 | 111.453600 | 40.945490 | -1.922220 |
| 432 | 112.046200 | 40.755770 | -1.960950 |
| 433 | 112.621800 | 40.545800 | -1.998410 |
| 434 | 113.178800 | 40.318240 | -2.034780 |
| 435 | 113.715600 | 40.075760 | -2.070240 |
| 436 | 114.230500 | 39.821000 | -2.104970 |
| 437 | 114.721800 | 39.556640 | -2.139130 |
| 438 | 115.188000 | 39.285320 | -2.172910 |
| 439 | 115.627400 | 39.009720 | -2.206480 |
| 440 | 116.038300 | 38.732470 | -2.240020 |
| 441 | 116.424600 | 38.445430 | -2.273910 |
| 442 | 116.792100 | 38.140610 | -2.308220 |
| 443 | 117.142400 | 37.820950 | -2.342590 |
| 444 | 117.477000 | 37.489380 | -2.376690 |
| 445 | 117.797400 | 37.148840 | -2.410160 |
| 446 | 118.105200 | 36.802270 | -2.442680 |
| 447 | 118.401900 | 36.452600 | -2.473890 |
| 448 | 118.689100 | 36.102770 | -2.503450 |
| 449 | 118.968100 | 35.755710 | -2.531020 |
| 450 | 119.240700 | 35.414370 | -2.556260 |
| 451 | 119.513300 | 35.075540 | -2.581070 |
| 452 | 119.788500 | 34.734410 | -2.607000 |
| 453 | 120.062100 | 34.391460 | -2.633150 |
| 454 | 120.329800 | 34.047170 | -2.658670 |
| 455 | 120.587300 | 33.702010 | -2.682660 |
| 456 | 120.830300 | 33.356480 | -2.704260 |
| 457 | 121.054500 | 33.011060 | -2.722590 |
| 458 | 121.255700 | 32.666220 | -2.736760 |
| 459 | 121.429500 | 32.322450 | -2.745910 |
| 460 | 121.571700 | 31.980230 | -2.749150 |
| 461 | 121.696800 | 31.640840 | -2.748420 |
| 462 | 121.820500 | 31.304500 | -2.746310 |
| 463 | 121.939800 | 30.970080 | -2.742920 |
| 464 | 122.052200 | 30.636450 | -2.738370 |
| 465 | 122.154800 | 30.302490 | -2.732770 |
| 466 | 122.244900 | 29.967080 | -2.726230 |
| 467 | 122.319800 | 29.629090 | -2.718880 |
| 468 | 122.376600 | 29.287400 | -2.710810 |
| 469 | 122.412800 | 28.940890 | -2.702150 |

| Wavelength / nm | $S_{0,s}(\lambda)$ | $S_{1,s}(\lambda)$ | $S_{2,s}(\lambda)$ |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 470 | 122.425400 | 28.588420 | -2.693000 |
| 471 | 122.399000 | 28.230890 | -2.680430 |
| 472 | 122.324000 | 27.869880 | -2.662040 |
| 473 | 122.206900 | 27.505290 | -2.638730 |
| 474 | 122.054000 | 27.137070 | -2.611390 |
| 475 | 121.871800 | 26.765120 | -2.580930 |
| 476 | 121.666700 | 26.389370 | -2.548240 |
| 477 | 121.445100 | 26.009740 | -2.514230 |
| 478 | 121.213500 | 25.626150 | -2.479800 |
| 479 | 120.978200 | 25.238520 | -2.445840 |
| 480 | 120.745600 | 24.846770 | -2.413260 |
| 481 | 120.491700 | 24.448610 | -2.380690 |
| 482 | 120.193400 | 24.042750 | -2.346400 |
| 483 | 119.858500 | 23.630630 | -2.310730 |
| 484 | 119.494800 | 23.213650 | -2.274000 |
| 485 | 119.110200 | 22.793260 | -2.236560 |
| 486 | 118.712500 | 22.370870 | -2.198740 |
| 487 | 118.309400 | 21.947910 | -2.160870 |
| 488 | 117.909000 | 21.525810 | -2.123300 |
| 489 | 117.518800 | 21.105990 | -2.086360 |
| 490 | 117.146900 | 20.689880 | -2.050390 |
| 491 | 116.781300 | 20.274660 | -2.015020 |
| 492 | 116.407100 | 19.857270 | -1.979700 |
| 493 | 116.028000 | 19.438810 | -1.944480 |
| 494 | 115.647700 | 19.020360 | -1.909420 |
| 495 | 115.269700 | 18.603020 | -1.874570 |
| 496 | 114.897700 | 18.187860 | -1.839970 |
| 497 | 114.535300 | 17.775990 | -1.805690 |
| 498 | 114.186100 | 17.368490 | -1.771770 |
| 499 | 113.853700 | 16.966450 | -1.738270 |
| 500 | 113.541800 | 16.570960 | -1.705240 |
| 501 | 113.246100 | 16.180560 | -1.672640 |
| 502 | 112.959600 | 15.793250 | -1.640400 |
| 503 | 112.682100 | 15.409260 | -1.608490 |
| 504 | 112.413300 | 15.028830 | -1.576910 |
| 505 | 112.152800 | 14.652190 | -1.545620 |
| 506 | 111.900500 | 14.279580 | -1.514620 |
| 507 | 111.655900 | 13.911230 | -1.483890 |
| 508 | 111.418900 | 13.547390 | -1.453400 |
| 509 | 111.189100 | 13.188280 | -1.423140 |
| 510 | 110.966200 | 12.834140 | -1.393090 |
| 511 | 110.751300 | 12.484560 | -1.363130 |
| 512 | 110.544800 | 12.138920 | -1.333190 |

| Wavelength / nm | $S_{0,s}(\lambda)$ | $S_{1,s}(\lambda)$ | $S_{2,s}(\lambda)$ |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 513 | 110.345500 | 11.797240 | -1.303360 |
| 514 | 110.152200 | 11.459480 | -1.273730 |
| 515 | 109.963900 | 11.125640 | -1.244400 |
| 516 | 109.779200 | 10.795720 | -1.215450 |
| 517 | 109.597000 | 10.469690 | -1.186980 |
| 518 | 109.416100 | 10.147540 | -1.159070 |
| 519 | 109.235400 | 9.829260 | -1.131800 |
| 520 | 109.053700 | 9.514840 | -1.105280 |
| 521 | 108.873100 | 9.203850 | -1.079320 |
| 522 | 108.695900 | 8.895950 | -1.053700 |
| 523 | 108.521400 | 8.591300 | -1.028470 |
| 524 | 108.348700 | 8.290050 | -1.003660 |
| 525 | 108.177100 | 7.992370 | -0.979320 |
| 526 | 108.005700 | 7.698410 | -0.955500 |
| 527 | 107.833800 | 7.408310 | -0.932230 |
| 528 | 107.660500 | 7.122250 | -0.909570 |
| 529 | 107.485100 | 6.840370 | -0.887540 |
| 530 | 107.306600 | 6.562830 | -0.866210 |
| 531 | 107.127500 | 6.288770 | -0.845820 |
| 532 | 106.949800 | 6.017440 | -0.826460 |
| 533 | 106.772400 | 5.749160 | -0.807870 |
| 534 | 106.594100 | 5.484250 | -0.789820 |
| 535 | 106.414000 | 5.223020 | -0.772070 |
| 536 | 106.230900 | 4.965800 | -0.754380 |
| 537 | 106.043800 | 4.712910 | -0.736500 |
| 538 | 105.851500 | 4.464650 | -0.718190 |
| 539 | 105.653100 | 4.221360 | -0.699210 |
| 540 | 105.447300 | 3.983350 | -0.679320 |
| 541 | 105.233600 | 3.749890 | -0.658960 |
| 542 | 105.012300 | 3.520100 | -0.638600 |
| 543 | 104.784100 | 3.294030 | -0.618060 |
| 544 | 104.549500 | 3.071750 | -0.597170 |
| 545 | 104.309200 | 2.853300 | -0.575740 |
| 546 | 104.063600 | 2.638760 | -0.553590 |
| 547 | 103.813500 | 2.428190 | -0.530540 |
| 548 | 103.559400 | 2.221640 | -0.506400 |
| 549 | 103.301900 | 2.019170 | -0.481010 |
| 550 | 103.041600 | 1.820860 | -0.454180 |
| 551 | 102.775700 | 1.626720 | -0.425680 |
| 552 | 102.501900 | 1.436550 | -0.395440 |
| 553 | 102.221500 | 1.250080 | -0.363520 |
| 554 | 101.935600 | 1.067020 | -0.329970 |
| 555 | 101.645600 | 0.887110 | -0.294830 |

| Wavelength / nm | $S_{0,s}(\lambda)$ | $S_{1,s}(\lambda)$ | $S_{2,s}(\lambda)$ |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 556 | 101.352700 | 0.710010 | -0.258160 |
| 557 | 101.058100 | 0.535600 | -0.219990 |
| 558 | 100.763000 | 0.363400 | -0.180400 |
| 559 | 100.468800 | 0.193340 | -0.139420 |
| 560 | 100.176500 | 0.024980 | -0.097100 |
| 561 | 99.883800 | -0.140920 | -0.052680 |
| 562 | 99.587880 | -0.303760 | -0.005530 |
| 563 | 99.289760 | -0.463960 | 0.044130 |
| 564 | 98.990430 | -0.621910 | 0.096058 |
| 565 | 98.690860 | -0.778040 | 0.150027 |
| 566 | 98.392060 | -0.932740 | 0.205802 |
| 567 | 98.095000 | -1.086440 | 0.263154 |
| 568 | 97.800670 | -1.239540 | 0.321849 |
| 569 | 97.510070 | -1.392450 | 0.381656 |
| 570 | 97.224170 | -1.545590 | 0.442342 |
| 571 | 96.940840 | -1.698490 | 0.504683 |
| 572 | 96.657810 | -1.850510 | 0.569445 |
| 573 | 96.375900 | -2.001710 | 0.636386 |
| 574 | 96.095940 | -2.152180 | 0.705260 |
| 575 | 95.818740 | -2.302010 | 0.775823 |
| 576 | 95.545120 | -2.451280 | 0.847831 |
| 577 | 95.275900 | -2.600050 | 0.921039 |
| 578 | 95.011900 | -2.748430 | 0.995205 |
| 579 | 94.753950 | -2.896490 | 1.070082 |
| 580 | 94.502850 | -3.044310 | 1.145428 |
| 581 | 94.257320 | -3.191890 | 1.221681 |
| 582 | 94.015590 | -3.339120 | 1.299375 |
| 583 | 93.777810 | -3.485980 | 1.378408 |
| 584 | 93.544110 | -3.632430 | 1.458678 |
| 585 | 93.314620 | -3.778450 | 1.540084 |
| 586 | 93.089480 | -3.923990 | 1.622524 |
| 587 | 92.868820 | -4.069030 | 1.705895 |
| 588 | 92.652780 | -4.213530 | 1.790097 |
| 589 | 92.441490 | -4.357470 | 1.875026 |
| 590 | 92.235100 | -4.500790 | 1.960582 |
| 591 | 92.033680 | -4.643730 | 2.047163 |
| 592 | 91.836960 | -4.786430 | 2.135119 |
| 593 | 91.644520 | -4.928780 | 2.224272 |
| 594 | 91.455970 | -5.070660 | 2.314445 |
| 595 | 91.270870 | -5.211960 | 2.405460 |
| 596 | 91.088810 | -5.352550 | 2.497140 |
| 597 | 90.909400 | -5.492320 | 2.589307 |
| 598 | 90.732200 | -5.631160 | 2.681785 |

| Wavelength / nm | $S_{0,s}(\lambda)$ | $S_{1,s}(\lambda)$ | $S_{2,s}(\lambda)$ |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 599 | 90.556810 | -5.768940 | 2.774396 |
| 600 | 90.382810 | -5.905550 | 2.866963 |
| 601 | 90.210790 | -6.041180 | 2.959838 |
| 602 | 90.041420 | -6.176080 | 3.053408 |
| 603 | 89.874470 | -6.310200 | 3.147538 |
| 604 | 89.709670 | -6.443500 | 3.242097 |
| 605 | 89.546790 | -6.575920 | 3.336953 |
| 606 | 89.385560 | -6.707420 | 3.431973 |
| 607 | 89.225740 | -6.837950 | 3.527025 |
| 608 | 89.067080 | -6.967470 | 3.621977 |
| 609 | 88.909330 | -7.095940 | 3.716696 |
| 610 | 88.752240 | -7.223300 | 3.811051 |
| 611 | 88.594730 | -7.349280 | 3.905003 |
| 612 | 88.436460 | -7.473800 | 3.998669 |
| 613 | 88.278250 | -7.597080 | 4.092148 |
| 614 | 88.120910 | -7.719370 | 4.185538 |
| 615 | 87.965270 | -7.840880 | 4.278938 |
| 616 | 87.812150 | -7.961860 | 4.372446 |
| 617 | 87.662380 | -8.082530 | 4.466163 |
| 618 | 87.516760 | -8.203120 | 4.560186 |
| 619 | 87.376130 | -8.323860 | 4.654614 |
| 620 | 87.241300 | -8.445000 | 4.749546 |
| 621 | 87.110840 | -8.566470 | 4.844806 |
| 622 | 86.982880 | -8.688020 | 4.940195 |
| 623 | 86.857650 | -8.809540 | 5.035777 |
| 624 | 86.735360 | -8.930950 | 5.131620 |
| 625 | 86.616200 | -9.052140 | 5.227787 |
| 626 | 86.500390 | -9.173010 | 5.324346 |
| 627 | 86.388150 | -9.293480 | 5.421361 |
| 628 | 86.279680 | -9.413450 | 5.518899 |
| 629 | 86.175190 | -9.532810 | 5.617024 |
| 630 | 86.074890 | -9.651470 | 5.715802 |
| 631 | 85.980380 | -9.770400 | 5.815548 |
| 632 | 85.892130 | -9.890210 | 5.916373 |
| 633 | 85.808600 | -10.010300 | 6.018041 |
| 634 | 85.728260 | -10.130200 | 6.120315 |
| 635 | 85.649590 | -10.249200 | 6.222957 |
| 636 | 85.571070 | -10.366800 | 6.325732 |
| 637 | 85.491170 | -10.482400 | 6.428402 |
| 638 | 85.408360 | -10.595500 | 6.530729 |
| 639 | 85.321130 | -10.705400 | 6.632478 |
| 640 | 85.227930 | -10.811600 | 6.733411 |
| 641 | 85.129110 | -10.914900 | 6.834096 |

| Wavelength / nm | $S_{0,s}(\lambda)$ | $S_{1,s}(\lambda)$ | $S_{2,s}(\lambda)$ |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 642 | 85.026270 | -11.016600 | 6.935096 |
| 643 | 84.919750 | -11.116400 | 7.036165 |
| 644 | 84.809920 | -11.214300 | 7.137060 |
| 645 | 84.697150 | -11.310200 | 7.237535 |
| 646 | 84.581790 | -11.404000 | 7.337346 |
| 647 | 84.464210 | -11.495600 | 7.436249 |
| 648 | 84.344770 | -11.585000 | 7.533999 |
| 649 | 84.223840 | -11.672000 | 7.630350 |
| 650 | 84.101770 | -11.756500 | 7.725059 |
| 651 | 83.977200 | -11.838900 | 7.819140 |
| 652 | 83.848910 | -11.919800 | 7.913432 |
| 653 | 83.717490 | -11.999000 | 8.007433 |
| 654 | 83.583510 | -12.076400 | 8.100639 |
| 655 | 83.447560 | -12.152100 | 8.192549 |
| 656 | 83.310210 | -12.225800 | 8.282659 |
| 657 | 83.172050 | -12.297500 | 8.370465 |
| 658 | 83.033660 | -12.367200 | 8.455465 |
| 659 | 82.895610 | -12.434700 | 8.537155 |
| 660 | 82.758490 | -12.500000 | 8.615033 |
| 661 | 82.624050 | -12.564500 | 8.691514 |
| 662 | 82.492630 | -12.629200 | 8.768613 |
| 663 | 82.362760 | -12.693400 | 8.845227 |
| 664 | 82.232950 | -12.756300 | 8.920251 |
| 665 | 82.101710 | -12.817100 | 8.992582 |
| 666 | 81.967540 | -12.875100 | 9.061116 |
| 667 | 81.828960 | -12.929600 | 9.124749 |
| 668 | 81.684470 | -12.979700 | 9.182378 |
| 669 | 81.532600 | -13.024800 | 9.232899 |
| 670 | 81.371850 | -13.064100 | 9.275208 |
| 671 | 81.200790 | -13.100800 | 9.313278 |
| 672 | 81.019580 | -13.138000 | 9.351212 |
| 673 | 80.829140 | -13.174700 | 9.388098 |
| 674 | 80.630380 | -13.209700 | 9.423024 |
| 675 | 80.424200 | -13.242200 | 9.455079 |
| 676 | 80.211510 | -13.271100 | 9.483349 |
| 677 | 79.993220 | -13.295300 | 9.506925 |
| 678 | 79.770250 | -13.313900 | 9.524893 |
| 679 | 79.543500 | -13.325800 | 9.536343 |
| 680 | 79.313870 | -13.330000 | 9.540362 |
| 681 | 79.074190 | -13.329200 | 9.538324 |
| 682 | 78.819210 | -13.327100 | 9.532508 |
| 683 | 78.552760 | -13.323600 | 9.523363 |
| 684 | 78.278660 | -13.319000 | 9.511338 |

| Wavelength / nm | $S_{0,s}(\lambda)$ | $S_{1,s}(\lambda)$ | $S_{2,s}(\lambda)$ |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 685 | 78.000740 | -13.313400 | 9.496882 |
| 686 | 77.722830 | -13.306800 | 9.480444 |
| 687 | 77.448750 | -13.299500 | 9.462472 |
| 688 | 77.182330 | -13.291500 | 9.443417 |
| 689 | 76.927390 | -13.283000 | 9.423725 |
| 690 | 76.687760 | -13.274000 | 9.403848 |
| 691 | 76.458540 | -13.262500 | 9.381364 |
| 692 | 76.232740 | -13.246700 | 9.354012 |
| 693 | 76.011020 | -13.227000 | 9.322478 |
| 694 | 75.794090 | -13.204100 | 9.287445 |
| 695 | 75.582600 | -13.178500 | 9.249600 |
| 696 | 75.377240 | -13.150800 | 9.209628 |
| 697 | 75.178690 | -13.121600 | 9.168214 |
| 698 | 74.987630 | -13.091400 | 9.126043 |
| 699 | 74.804740 | -13.060800 | 9.083800 |
| 700 | 74.630700 | -13.030300 | 9.042170 |
| 701 | 74.467710 | -12.999000 | 9.000154 |
| 702 | 74.315800 | -12.965400 | 8.956417 |
| 703 | 74.172400 | -12.929700 | 8.911141 |
| 704 | 74.034950 | -12.892100 | 8.864508 |
| 705 | 73.900860 | -12.852700 | 8.816700 |
| 706 | 73.767570 | -12.811700 | 8.767900 |
| 707 | 73.632500 | -12.769200 | 8.718290 |
| 708 | 73.493080 | -12.725300 | 8.668051 |
| 709 | 73.346750 | -12.680300 | 8.617367 |
| 710 | 73.190920 | -12.634200 | 8.566419 |
| 711 | 73.026830 | -12.586000 | 8.514441 |
| 712 | 72.857620 | -12.534600 | 8.460795 |
| 713 | 72.683570 | -12.480600 | 8.405854 |
| 714 | 72.504960 | -12.424500 | 8.349992 |
| 715 | 72.322100 | -12.366700 | 8.293583 |
| 716 | 72.135260 | -12.307800 | 8.237001 |
| 717 | 71.944740 | -12.248200 | 8.180619 |
| 718 | 71.750820 | -12.188500 | 8.124813 |
| 719 | 71.553790 | -12.129100 | 8.069954 |
| 720 | 71.353940 | -12.070600 | 8.016418 |
| 721 | 71.148510 | -12.012000 | 7.963455 |
| 722 | 70.935520 | -11.952300 | 7.910253 |
| 723 | 70.716400 | -11.891900 | 7.857093 |
| 724 | 70.492570 | -11.831100 | 7.804255 |
| 725 | 70.265460 | -11.770100 | 7.752017 |
| 726 | 70.036510 | -11.709300 | 7.700661 |
| 727 | 69.807150 | -11.649100 | 7.650465 |

| Wavelength / nm | $S_{0,s}(\lambda)$ | $S_{1,s}(\lambda)$ | $S_{2,s}(\lambda)$ |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 728 | 69.578800 | -11.589600 | 7.601709 |
| 729 | 69.352890 | -11.531300 | 7.554674 |
| 730 | 69.130860 | -11.474400 | 7.509639 |
| 731 | 68.908510 | -11.418000 | 7.465744 |
| 732 | 68.682020 | -11.361100 | 7.422152 |
| 733 | 68.453390 | -11.304200 | 7.379175 |
| 734 | 68.224630 | -11.247800 | 7.337125 |
| 735 | 67.997720 | -11.192400 | 7.296314 |
| 736 | 67.774660 | -11.138300 | 7.257055 |
| 737 | 67.557450 | -11.086200 | 7.219659 |
| 738 | 67.348090 | -11.036400 | 7.184439 |
| 739 | 67.148580 | -10.989500 | 7.151706 |
| 740 | 66.960900 | -10.945800 | 7.121774 |
| 741 | 66.781270 | -10.904100 | 7.093453 |
| 742 | 66.605040 | -10.863000 | 7.065563 |
| 743 | 66.432970 | -10.822800 | 7.038434 |
| 744 | 66.265790 | -10.784000 | 7.012395 |
| 745 | 66.104250 | -10.746800 | 6.987772 |
| 746 | 65.949090 | -10.711700 | 6.964895 |
| 747 | 65.801050 | -10.679100 | 6.944092 |
| 748 | 65.660880 | -10.649300 | 6.925691 |
| 749 | 65.529310 | -10.622600 | 6.910021 |
| 750 | 65.407090 | -10.599600 | 6.897409 |
| 751 | 65.295100 | -10.579700 | 6.887301 |
| 752 | 65.192420 | -10.562100 | 6.878702 |
| 753 | 65.097030 | -10.546300 | 6.871284 |
| 754 | 65.006920 | -10.531800 | 6.864718 |
| 755 | 64.920100 | -10.518200 | 6.858674 |
| 756 | 64.834550 | -10.505100 | 6.852824 |
| 757 | 64.748270 | -10.491800 | 6.846840 |
| 758 | 64.659260 | -10.478100 | 6.840392 |
| 759 | 64.565500 | -10.463300 | 6.833151 |
| 760 | 64.464990 | -10.447100 | 6.824790 |
| 761 | 64.358510 | -10.429700 | 6.815316 |
| 762 | 64.248440 | -10.411800 | 6.805027 |
| 763 | 64.135210 | -10.393300 | 6.794022 |
| 764 | 64.019270 | -10.374400 | 6.782401 |
| 765 | 63.901030 | -10.355000 | 6.770265 |
| 766 | 63.780940 | -10.335200 | 6.757713 |
| 767 | 63.659420 | -10.315000 | 6.744847 |
| 768 | 63.536910 | -10.294500 | 6.731765 |
| 769 | 63.413840 | -10.273800 | 6.718568 |
| 770 | 63.290640 | -10.252800 | 6.705357 |

| Wavelength / nm | $S_{0,s}(\lambda)$ | $S_{1,s}(\lambda)$ | $S_{2,s}(\lambda)$ |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 771 | 63.164480 | -10.231000 | 6.691683 |
| 772 | 63.033330 | -10.208100 | 6.677182 |
| 773 | 62.898790 | -10.184300 | 6.662076 |
| 774 | 62.762450 | -10.160100 | 6.646590 |
| 775 | 62.625940 | -10.135600 | 6.630946 |
| 776 | 62.490850 | -10.111300 | 6.615369 |
| 777 | 62.358780 | -10.087500 | 6.600082 |
| 778 | 62.231340 | -10.064400 | 6.585309 |
| 779 | 62.110140 | -10.042500 | 6.571273 |
| 780 | 61.996780 | -10.021900 | 6.558197 |
| 781 | 61.889040 | -10.002400 | 6.545805 |
| 782 | 61.783790 | -9.983250 | 6.533685 |
| 783 | 61.681220 | -9.964600 | 6.521860 |
| 784 | 61.581570 | -9.946440 | 6.510353 |
| 785 | 61.485030 | -9.928790 | 6.499186 |
| 786 | 61.391820 | -9.911700 | 6.488381 |
| 787 | 61.302150 | -9.895170 | 6.477962 |
| 788 | 61.216240 | -9.879250 | 6.467951 |
| 789 | 61.134300 | -9.863950 | 6.458370 |
| 790 | 61.056540 | -9.849320 | 6.449243 |
| 791 | 60.982070 | -9.835230 | 6.440488 |
| 792 | 60.909910 | -9.821580 | 6.432008 |
| 793 | 60.840120 | -9.808350 | 6.423804 |
| 794 | 60.772800 | -9.795550 | 6.415876 |
| 795 | 60.707990 | -9.783150 | 6.408224 |
| 796 | 60.645790 | -9.771170 | 6.400849 |
| 797 | 60.586250 | -9.759600 | 6.393751 |
| 798 | 60.529460 | -9.748420 | 6.386930 |
| 799 | 60.475490 | -9.737640 | 6.380386 |
| 800 | 60.424410 | -9.727260 | 6.374120 |
| 801 | 60.375460 | -9.717200 | 6.368082 |
| 802 | 60.327960 | -9.707440 | 6.362224 |
| 803 | 60.282030 | -9.697950 | 6.356550 |
| 804 | 60.237820 | -9.688760 | 6.351065 |
| 805 | 60.195450 | -9.679860 | 6.345775 |
| 806 | 60.155060 | -9.671250 | 6.340682 |
| 807 | 60.116800 | -9.662930 | 6.335793 |
| 808 | 60.080790 | -9.654900 | 6.331112 |
| 809 | 60.047170 | -9.647170 | 6.326643 |
| 810 | 60.016090 | -9.639740 | 6.322392 |
| 811 | 59.986300 | -9.632520 | 6.318280 |
| 812 | 59.956760 | -9.625430 | 6.314245 |
| 813 | 59.927920 | -9.618520 | 6.310313 |

| Wavelength / nm | $S_{0,s}(\lambda)$ | $S_{1,s}(\lambda)$ | $S_{2,s}(\lambda)$ |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 814 | 59.900210 | -9.611810 | 6.306510 |
| 815 | 59.874050 | -9.605320 | 6.302863 |
| 816 | 59.849880 | -9.599090 | 6.299396 |
| 817 | 59.828130 | -9.593160 | 6.296136 |
| 818 | 59.809240 | -9.587540 | 6.293110 |
| 819 | 59.793640 | -9.582270 | 6.290342 |
| 820 | 59.781760 | -9.577380 | 6.287860 |
| 821 | 59.772010 | -9.572760 | 6.285561 |
| 822 | 59.762620 | -9.568280 | 6.283338 |
| 823 | 59.753740 | -9.563960 | 6.281207 |
| 824 | 59.745530 | -9.559830 | 6.279186 |
| 825 | 59.738150 | -9.555890 | 6.277289 |
| 826 | 59.731750 | -9.552160 | 6.275535 |
| 827 | 59.726510 | -9.548680 | 6.273939 |
| 828 | 59.722560 | -9.545450 | 6.272517 |
| 829 | 59.720080 | -9.542490 | 6.271287 |
| 830 | 59.719220 | -9.539820 | 6.270266 |

ANNEXE III

LOWESS SMOOTHED D₅₀, D₆₀, D₆₅, D₇₀, D₇₅, ID₅₀ AND ID₆₅ SPECTRA

| Wavelength | sD50 | sD55 | sD60 | sD65 | sD70 | sD75 | sID50 | sID65 |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 300 | 0.658975 | 0.573493 | 0.560155 | 0.590946 | 0.648186 | 0.721014 | 0 | 0 |
| 301 | 1.008442 | 1.091483 | 1.308050 | 1.598161 | 1.925757 | 2.269781 | 0 | 0 |
| 302 | 1.357554 | 1.607348 | 2.050708 | 2.596351 | 3.190208 | 3.801234 | 0 | 0 |
| 303 | 1.706310 | 2.121072 | 2.788066 | 3.585372 | 4.441293 | 5.315014 | 0 | 0 |
| 304 | 2.054709 | 2.632642 | 3.520062 | 4.565081 | 5.678768 | 6.810762 | 0 | 0 |
| 305 | 2.402750 | 3.142044 | 4.246633 | 5.535334 | 6.902387 | 8.288118 | 0 | 0 |
| 306 | 2.750434 | 3.649264 | 4.967717 | 6.495989 | 8.111906 | 9.746722 | 0 | 0 |
| 307 | 3.097759 | 4.154288 | 5.683251 | 7.446902 | 9.307079 | 11.18622 | 0 | 0 |
| 308 | 3.444725 | 4.657101 | 6.393173 | 8.387931 | 10.48766 | 12.60624 | 0 | 0 |
| 309 | 3.791332 | 5.157690 | 7.097421 | 9.318932 | 11.65341 | 14.00644 | 0 | 0 |
| 310 | 4.137579 | 5.656040 | 7.795933 | 10.23976 | 12.80407 | 15.38645 | 0 | 0 |
| 311 | 4.483201 | 6.151879 | 8.488647 | 11.15080 | 13.94063 | 16.74793 | 0 | 0 |
| 312 | 4.828053 | 6.645089 | 9.175687 | 12.05261 | 15.06423 | 18.09271 | 0 | 0 |
| 313 | 5.172312 | 7.135892 | 9.857266 | 12.94535 | 16.17492 | 19.42068 | 0 | 0 |
| 314 | 5.516158 | 7.624510 | 10.53360 | 13.82916 | 17.27272 | 20.73174 | 0 | 0.370920 |
| 315 | 5.859767 | 8.111163 | 11.20490 | 14.70418 | 18.35767 | 22.02577 | 0.011169 | 0.776641 |
| 316 | 6.203317 | 8.596072 | 11.87138 | 15.57056 | 19.42979 | 23.30266 | 0.164514 | 1.195621 |
| 317 | 6.546986 | 9.079460 | 12.53326 | 16.42845 | 20.48913 | 24.56230 | 0.325959 | 1.626302 |
| 318 | 6.890952 | 9.561548 | 13.19074 | 17.27799 | 21.53571 | 25.80459 | 0.493443 | 2.067123 |
| 319 | 7.235393 | 10.04256 | 13.84405 | 18.11932 | 22.56957 | 27.02941 | 0.664906 | 2.516527 |
| 320 | 7.580486 | 10.52271 | 14.49340 | 18.95259 | 23.59074 | 28.23665 | 0.838290 | 2.972953 |
| 321 | 7.925766 | 11.00142 | 15.13829 | 19.77768 | 24.59964 | 29.42744 | 1.019100 | 3.440874 |
| 322 | 8.270789 | 11.47815 | 15.77831 | 20.59453 | 25.59680 | 30.60300 | 1.213475 | 3.925105 |
| 323 | 8.615769 | 11.95318 | 16.41375 | 21.40340 | 26.58239 | 31.76336 | 1.420305 | 4.424607 |
| 324 | 8.960916 | 12.42677 | 17.04491 | 22.20456 | 27.55659 | 32.90857 | 1.638483 | 4.938338 |
| 325 | 9.306445 | 12.89922 | 17.67210 | 22.99827 | 28.51955 | 34.03868 | 1.866899 | 5.465257 |
| 326 | 9.652567 | 13.37079 | 18.29562 | 23.78479 | 29.47147 | 35.15373 | 2.104445 | 6.004324 |
| 327 | 9.999495 | 13.84176 | 18.91576 | 24.56439 | 30.41250 | 36.25377 | 2.350012 | 6.554497 |
| 328 | 10.34744 | 14.31241 | 19.53284 | 25.33733 | 31.34283 | 37.33883 | 2.602490 | 7.114737 |
| 329 | 10.69662 | 14.78302 | 20.14715 | 26.10386 | 32.26261 | 38.40898 | 2.860772 | 7.684002 |
| 330 | 11.04724 | 15.25386 | 20.75899 | 26.86427 | 33.17203 | 39.46424 | 3.123748 | 8.261251 |
| 331 | 11.39894 | 15.72444 | 21.36794 | 27.61846 | 34.07160 | 40.50589 | 3.394758 | 8.849343 |
| 332 | 11.75129 | 16.19420 | 21.97348 | 28.36624 | 34.96167 | 41.53499 | 3.677420 | 9.451452 |
| 333 | 12.10443 | 16.66332 | 22.57579 | 29.10770 | 35.84218 | 42.55131 | 3.971043 | 10.06701 |
| 334 | 12.45851 | 17.13198 | 23.17502 | 29.84294 | 36.71309 | 43.55460 | 4.274938 | 10.69544 |
| 335 | 12.81364 | 17.60034 | 23.77136 | 30.57205 | 37.57435 | 44.54462 | 4.588413 | 11.33618 |
| 336 | 13.16998 | 18.06858 | 24.36496 | 31.29510 | 38.42590 | 45.52113 | 4.910780 | 11.98866 |
| 337 | 13.52766 | 18.53687 | 24.95599 | 32.01220 | 39.26768 | 46.48388 | 5.241347 | 12.65230 |
| 338 | 13.88681 | 19.00539 | 25.54463 | 32.72343 | 40.09966 | 47.43262 | 5.579424 | 13.32655 |
| 339 | 14.24757 | 19.47430 | 26.13104 | 33.42889 | 40.92176 | 48.36713 | 5.924322 | 14.01082 |
| 340 | 14.61007 | 19.94379 | 26.71538 | 34.12866 | 41.73395 | 49.28715 | 6.275349 | 14.70456 |

| Wavelength | sD50 | sD55 | sD60 | sD65 | sD70 | sD75 | sID50 | sID65 |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 341 | 14.97466 | 20.41431 | 27.29850 | 34.82433 | 42.53890 | 50.19669 | 6.634688 | 15.40902 |
| 342 | 15.34141 | 20.88592 | 27.88071 | 35.51681 | 43.33839 | 51.09866 | 7.004747 | 16.12595 |
| 343 | 15.71001 | 21.35823 | 28.46139 | 36.20513 | 44.13101 | 51.99111 | 7.385179 | 16.85547 |
| 344 | 16.08020 | 21.83084 | 29.03992 | 36.88834 | 44.91537 | 52.87213 | 7.775635 | 17.59770 |
| 345 | 16.45169 | 22.30336 | 29.61568 | 37.56547 | 45.69005 | 53.73978 | 8.175766 | 18.35278 |
| 346 | 16.82419 | 22.77538 | 30.18806 | 38.23556 | 46.45366 | 54.59215 | 8.585224 | 19.12084 |
| 347 | 17.19742 | 23.24651 | 30.75643 | 38.89765 | 47.20479 | 55.42731 | 9.003660 | 19.90200 |
| 348 | 17.57109 | 23.71635 | 31.32018 | 39.55079 | 47.94203 | 56.24332 | 9.430727 | 20.69639 |
| 349 | 17.94493 | 24.18449 | 31.87870 | 40.19402 | 48.66398 | 57.03827 | 9.866075 | 21.50413 |
| 350 | 18.31865 | 24.65055 | 32.43135 | 40.82637 | 49.36924 | 57.81022 | 10.30936 | 22.32537 |
| 351 | 18.69472 | 25.11797 | 32.98336 | 41.45570 | 50.06911 | 58.57462 | 10.76233 | 23.16084 |
| 352 | 19.07483 | 25.58907 | 33.53834 | 42.08762 | 50.77181 | 59.34284 | 11.22682 | 24.01141 |
| 353 | 19.45747 | 26.06180 | 34.09326 | 42.71775 | 51.47131 | 60.10686 | 11.70254 | 24.87731 |
| 354 | 19.84117 | 26.53408 | 34.64510 | 43.34175 | 52.16158 | 60.85868 | 12.18922 | 25.75882 |
| 355 | 20.22441 | 27.00385 | 35.19084 | 43.95526 | 52.83656 | 61.59028 | 12.68659 | 26.65618 |
| 356 | 20.60572 | 27.46906 | 35.72745 | 44.55391 | 53.49024 | 62.29365 | 13.19439 | 27.56966 |
| 357 | 20.98359 | 27.92763 | 36.25191 | 45.13334 | 54.11658 | 62.96077 | 13.71233 | 28.49951 |
| 358 | 21.35654 | 28.37750 | 36.76120 | 45.68921 | 54.70954 | 63.58364 | 14.24015 | 29.44599 |
| 359 | 21.72308 | 28.81661 | 37.25229 | 46.21715 | 55.26308 | 64.15424 | 14.77757 | 30.40937 |
| 360 | 22.08171 | 29.24290 | 37.72217 | 46.71281 | 55.77117 | 64.66455 | 15.32432 | 31.38989 |
| 361 | 22.42623 | 29.64862 | 38.16224 | 47.16803 | 56.22760 | 65.11186 | 15.88297 | 32.39578 |
| 362 | 22.75485 | 30.03188 | 38.57161 | 47.58435 | 56.63792 | 65.50726 | 16.45569 | 33.43207 |
| 363 | 23.07271 | 30.39944 | 38.95881 | 47.97197 | 57.01374 | 65.86349 | 17.04167 | 34.49426 |
| 364 | 23.38492 | 30.75803 | 39.33235 | 48.34108 | 57.36667 | 66.19325 | 17.64009 | 35.57783 |
| 365 | 23.69661 | 31.11438 | 39.70075 | 48.70185 | 57.70832 | 66.50925 | 18.25013 | 36.67825 |
| 366 | 24.01292 | 31.47524 | 40.07252 | 49.06448 | 58.05029 | 66.82423 | 18.87097 | 37.79101 |
| 367 | 24.33896 | 31.84734 | 40.45619 | 49.43916 | 58.40419 | 67.15089 | 19.50178 | 38.91160 |
| 368 | 24.67986 | 32.23743 | 40.86026 | 49.83607 | 58.78164 | 67.50194 | 20.14176 | 40.03549 |
| 369 | 25.04074 | 32.65224 | 41.29325 | 50.26540 | 59.19423 | 67.89012 | 20.79007 | 41.15816 |
| 370 | 25.42674 | 33.09851 | 41.76369 | 50.73734 | 59.65359 | 68.32813 | 21.44590 | 42.27511 |
| 371 | 25.84187 | 33.58114 | 42.27673 | 51.25712 | 60.16511 | 68.82179 | 22.11653 | 43.39873 |
| 372 | 26.28446 | 34.09765 | 42.82857 | 51.81966 | 60.72273 | 69.36454 | 22.80722 | 44.54065 |
| 373 | 26.75115 | 34.64372 | 43.41429 | 52.41963 | 61.32084 | 69.95053 | 23.51409 | 45.69519 |
| 374 | 27.23855 | 35.21504 | 44.02898 | 53.05173 | 61.95384 | 70.57395 | 24.23325 | 46.85665 |
| 375 | 27.74329 | 35.80729 | 44.66772 | 53.71062 | 62.61613 | 71.22894 | 24.96083 | 48.01935 |
| 376 | 28.26198 | 36.41615 | 45.32559 | 54.39100 | 63.30211 | 71.90967 | 25.69296 | 49.17759 |
| 377 | 28.79126 | 37.03731 | 45.99767 | 55.08755 | 64.00617 | 72.61031 | 26.42575 | 50.32569 |
| 378 | 29.32774 | 37.66645 | 46.67904 | 55.79495 | 64.72270 | 73.32501 | 27.15531 | 51.45796 |
| 379 | 29.86805 | 38.29924 | 47.36478 | 56.50788 | 65.44611 | 74.04795 | 27.87779 | 52.56872 |
| 380 | 30.40880 | 38.93139 | 48.04998 | 57.22104 | 66.17080 | 74.77327 | 28.58928 | 53.65226 |
| 381 | 30.95507 | 39.56980 | 48.74339 | 57.94499 | 66.90916 | 75.51525 | 29.29314 | 54.71531 |
| 382 | 31.51350 | 40.22317 | 49.45546 | 58.69174 | 67.67469 | 76.28887 | 29.99524 | 55.76783 |

| wavelength | sD50 | sD55 | sD60 | sD65 | sD70 | sD75 | sID50 | sID65 |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 383 | 32.08311 | 40.88983 | 50.18376 | 59.45810 | 68.46341 | 77.08937 | 30.69554 | 56.80906 |
| 384 | 32.66289 | 41.56812 | 50.92588 | 60.24087 | 69.27135 | 77.91201 | 31.39398 | 57.83823 |
| 385 | 33.25187 | 42.25637 | 51.67941 | 61.03686 | 70.09453 | 78.75203 | 32.09051 | 58.85455 |
| 386 | 33.84903 | 42.95291 | 52.44191 | 61.84287 | 70.92899 | 79.60471 | 32.78508 | 59.85725 |
| 387 | 34.45339 | 43.65609 | 53.21098 | 62.65570 | 71.77074 | 80.46528 | 33.47765 | 60.84557 |
| 388 | 35.06396 | 44.36423 | 53.98420 | 63.47217 | 72.61582 | 81.32899 | 34.16815 | 61.81871 |
| 389 | 35.67973 | 45.07566 | 54.75914 | 64.28908 | 73.46024 | 82.19111 | 34.85655 | 62.77592 |
| 390 | 36.29972 | 45.78873 | 55.53339 | 65.10322 | 74.30004 | 83.04688 | 35.54278 | 63.71641 |
| 391 | 36.92368 | 46.50375 | 56.30817 | 65.91684 | 75.13849 | 83.90064 | 36.22273 | 64.63600 |
| 392 | 37.55267 | 47.22274 | 57.08671 | 66.73452 | 75.98159 | 84.75980 | 36.89417 | 65.53362 |
| 393 | 38.18767 | 47.94654 | 57.86968 | 67.55667 | 76.82946 | 85.62420 | 37.55990 | 66.41318 |
| 394 | 38.82965 | 48.67604 | 58.65772 | 68.38367 | 77.68222 | 86.49366 | 38.22271 | 67.27859 |
| 395 | 39.47958 | 49.41211 | 59.45148 | 69.21592 | 78.53997 | 87.36801 | 38.88541 | 68.13375 |
| 396 | 40.13843 | 50.15559 | 60.25163 | 70.05381 | 79.40283 | 88.24710 | 39.55078 | 68.98257 |
| 397 | 40.80718 | 50.90737 | 61.05880 | 70.89772 | 80.27091 | 89.13075 | 40.22162 | 69.82895 |
| 398 | 41.48679 | 51.66831 | 61.87365 | 71.74805 | 81.14433 | 90.01880 | 40.90072 | 70.67682 |
| 399 | 42.17825 | 52.43928 | 62.69684 | 72.60520 | 82.02320 | 90.91109 | 41.59089 | 71.53007 |
| 400 | 42.88251 | 53.22113 | 63.52901 | 73.46954 | 82.90764 | 91.80744 | 42.29491 | 72.39260 |
| 401 | 43.60126 | 54.01538 | 64.37177 | 74.34292 | 83.79974 | 92.71025 | 43.01056 | 73.25983 |
| 402 | 44.33481 | 54.82219 | 65.22550 | 75.22606 | 84.70065 | 93.62108 | 43.73390 | 74.12514 |
| 403 | 45.08213 | 55.64046 | 66.08901 | 76.11769 | 85.60901 | 94.53850 | 44.46513 | 74.98943 |
| 404 | 45.84217 | 56.46910 | 66.96111 | 77.01652 | 86.52346 | 95.46108 | 45.20446 | 75.85359 |
| 405 | 46.61390 | 57.30700 | 67.84062 | 77.92128 | 87.44263 | 96.38739 | 45.95211 | 76.71852 |
| 406 | 47.39627 | 58.15306 | 68.72633 | 78.83069 | 88.36518 | 97.31601 | 46.70829 | 77.58512 |
| 407 | 48.18825 | 59.00618 | 69.61706 | 79.74347 | 89.28974 | 98.24552 | 47.47322 | 78.45429 |
| 408 | 48.98880 | 59.86526 | 70.51163 | 80.65834 | 90.21496 | 99.17447 | 48.24709 | 79.32692 |
| 409 | 49.79687 | 60.72919 | 71.40883 | 81.57403 | 91.13948 | 100.1014 | 49.03013 | 80.2039 |
| 410 | 50.61143 | 61.59687 | 72.30748 | 82.48926 | 92.06195 | 101.0250 | 49.82254 | 81.08614 |
| 411 | 51.43898 | 62.47489 | 73.21449 | 83.41136 | 92.99016 | 101.9535 | 50.62938 | 81.97871 |
| 412 | 52.28445 | 63.36815 | 74.13499 | 84.34577 | 93.92986 | 102.8929 | 51.45347 | 82.88352 |
| 413 | 53.14445 | 64.27304 | 75.06508 | 85.28831 | 94.87662 | 103.8385 | 52.29172 | 83.79673 |
| 414 | 54.01558 | 65.18596 | 76.00091 | 86.23484 | 95.82598 | 104.7856 | 53.14099 | 84.71450 |
| 415 | 54.89446 | 66.10328 | 76.93859 | 87.18118 | 96.77350 | 105.7295 | 53.99819 | 85.63299 |
| 416 | 55.77768 | 67.02142 | 77.87423 | 88.12317 | 97.71474 | 106.6654 | 54.86019 | 86.54836 |
| 417 | 56.66186 | 67.93675 | 78.80398 | 89.05666 | 98.64524 | 107.5887 | 55.72389 | 87.45676 |
| 418 | 57.54359 | 68.84566 | 79.72394 | 89.97748 | 99.56058 | 108.4946 | 56.58616 | 88.35436 |
| 419 | 58.41949 | 69.74455 | 80.63024 | 90.88148 | 100.4563 | 109.3784 | 57.44390 | 89.23731 |
| 420 | 59.28616 | 70.62981 | 81.51900 | 91.76448 | 101.3280 | 110.2354 | 58.29400 | 90.10178 |
| 421 | 60.15083 | 71.50930 | 82.39916 | 92.63676 | 102.1873 | 111.0788 | 59.14338 | 90.95766 |
| 422 | 61.02101 | 72.39120 | 83.27988 | 93.50863 | 103.0459 | 111.9217 | 59.99913 | 91.81464 |
| 423 | 61.89380 | 73.27237 | 84.15760 | 94.37597 | 103.8990 | 112.7585 | 60.85837 | 92.66859 |
| 424 | 62.76627 | 74.14967 | 85.02876 | 95.23470 | 104.7418 | 113.5838 | 61.71818 | 93.51535 |

| Wavelength | sD50 | sD55 | sD60 | sD65 | sD70 | sD75 | sD50 | sD65 |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 425 | 63.63551 | 75.01995 | 85.88981 | 96.08071 | 105.5697 | 114.3921 | 62.57569 | 94.35078 |
| 426 | 64.49859 | 75.88008 | 86.73719 | 96.90989 | 106.3779 | 115.1781 | 63.42799 | 95.17072 |
| 427 | 65.35259 | 76.72692 | 87.56734 | 97.71815 | 107.1617 | 115.9363 | 64.27220 | 95.97104 |
| 428 | 66.19459 | 77.55733 | 88.37671 | 98.50139 | 107.9163 | 116.6612 | 65.10541 | 96.74758 |
| 429 | 67.02168 | 78.36816 | 89.16174 | 99.25549 | 108.6370 | 117.3475 | 65.92473 | 97.49619 |
| 430 | 67.83093 | 79.15627 | 89.91886 | 99.97637 | 109.3190 | 117.9896 | 66.72727 | 98.21274 |
| 431 | 68.62595 | 79.92604 | 90.65380 | 100.6716 | 109.9723 | 118.6004 | 67.51624 | 98.90386 |
| 432 | 69.41209 | 80.68372 | 91.37433 | 101.3509 | 110.6091 | 119.1947 | 68.29667 | 99.57876 |
| 433 | 70.18898 | 81.42899 | 92.07999 | 102.0136 | 111.2281 | 119.7708 | 69.06840 | 100.2371 |
| 434 | 70.95631 | 82.16153 | 92.77029 | 102.6588 | 111.8280 | 120.3267 | 69.83128 | 100.8786 |
| 435 | 71.71372 | 82.88101 | 93.44478 | 103.2858 | 112.4076 | 120.8604 | 70.58515 | 101.5030 |
| 436 | 72.46087 | 83.58712 | 94.10298 | 103.8938 | 112.9656 | 121.3702 | 71.32986 | 102.1098 |
| 437 | 73.19742 | 84.27952 | 94.74443 | 104.4821 | 113.5009 | 121.8540 | 72.06526 | 102.6989 |
| 438 | 73.92304 | 84.95791 | 95.36866 | 105.0497 | 114.0121 | 122.3099 | 72.79119 | 103.2698 |
| 439 | 74.63738 | 85.62196 | 95.97519 | 105.5961 | 114.4980 | 122.7360 | 73.50750 | 103.8222 |
| 440 | 75.34010 | 86.27134 | 96.56356 | 106.1203 | 114.9573 | 123.1305 | 74.21404 | 104.3559 |
| 441 | 76.03137 | 86.90632 | 97.13448 | 106.6241 | 115.3932 | 123.4988 | 74.91050 | 104.8711 |
| 442 | 76.71196 | 87.52794 | 97.68970 | 107.1104 | 115.8105 | 123.8483 | 75.59713 | 105.3692 |
| 443 | 77.38245 | 88.13701 | 98.23028 | 107.5804 | 116.2106 | 124.1805 | 76.27459 | 105.8518 |
| 444 | 78.04338 | 88.73437 | 98.75733 | 108.0355 | 116.5948 | 124.4964 | 76.94353 | 106.3205 |
| 445 | 78.69531 | 89.32086 | 99.27191 | 108.4769 | 116.9645 | 124.7973 | 77.60460 | 106.7769 |
| 446 | 79.33880 | 89.89728 | 99.77511 | 108.9059 | 117.3209 | 125.0844 | 78.25846 | 107.2224 |
| 447 | 79.97442 | 90.46449 | 100.2680 | 109.3237 | 117.6655 | 125.3589 | 78.90576 | 107.6586 |
| 448 | 80.60271 | 91.02330 | 100.7517 | 109.7316 | 117.9994 | 125.6220 | 79.54716 | 108.0872 |
| 449 | 81.22425 | 91.57454 | 101.2273 | 110.1308 | 118.3241 | 125.8750 | 80.18331 | 108.5096 |
| 450 | 81.83958 | 92.11905 | 101.6958 | 110.5227 | 118.6409 | 126.1191 | 80.81486 | 108.9274 |
| 451 | 82.45301 | 92.66169 | 102.1627 | 110.9135 | 118.9574 | 126.3644 | 81.44593 | 109.3459 |
| 452 | 83.06655 | 93.20458 | 102.6303 | 111.3057 | 119.2768 | 126.6163 | 82.07822 | 109.7667 |
| 453 | 83.67728 | 93.74440 | 103.0948 | 111.6952 | 119.5945 | 126.8684 | 82.70883 | 110.1858 |
| 454 | 84.28229 | 94.27785 | 103.5527 | 112.0779 | 119.9056 | 127.1147 | 83.33483 | 110.5994 |
| 455 | 84.87868 | 94.80162 | 104.0001 | 112.4498 | 120.2054 | 127.3491 | 83.95330 | 111.0035 |
| 456 | 85.46353 | 95.31241 | 104.4334 | 112.8066 | 120.4891 | 127.5652 | 84.56134 | 111.3942 |
| 457 | 86.03394 | 95.80690 | 104.8490 | 113.1443 | 120.7518 | 127.7570 | 85.15601 | 111.7676 |
| 458 | 86.58699 | 96.28178 | 105.2432 | 113.4587 | 120.9887 | 127.9182 | 85.73441 | 112.1198 |
| 459 | 87.11979 | 96.73375 | 105.6123 | 113.7458 | 121.1952 | 128.0428 | 86.29360 | 112.4468 |
| 460 | 87.62942 | 97.15951 | 105.9525 | 114.0013 | 121.3664 | 128.1246 | 86.83068 | 112.7447 |
| 461 | 88.12720 | 97.57447 | 106.2863 | 114.2452 | 121.5189 | 128.1813 | 87.35655 | 113.0357 |
| 462 | 88.62336 | 97.99190 | 106.6314 | 114.4951 | 121.6703 | 128.2346 | 87.88107 | 113.3383 |
| 463 | 89.11330 | 98.40528 | 106.9778 | 114.7436 | 121.8170 | 128.2838 | 88.39972 | 113.6424 |
| 464 | 89.59245 | 98.80807 | 107.3151 | 114.9831 | 121.9557 | 128.3284 | 88.90803 | 113.9381 |
| 465 | 90.05622 | 99.19375 | 107.6331 | 115.2062 | 122.0826 | 128.3677 | 89.40148 | 114.2155 |
| 466 | 90.50004 | 99.55577 | 107.9216 | 115.4055 | 122.1944 | 128.4013 | 89.87559 | 114.4647 |

| Wavelength | sD50 | sD55 | sD60 | sD65 | sD70 | sD75 | sID50 | sID65 |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 467 | 90.91931 | 99.88762 | 108.1704 | 115.5735 | 122.2874 | 128.4284 | 90.32586 | 114.6758 |
| 468 | 91.30946 | 100.1828 | 108.3693 | 115.7027 | 122.3583 | 128.4485 | 90.74778 | 114.8389 |
| 469 | 91.66590 | 100.4346 | 108.5080 | 115.7857 | 122.4034 | 128.4610 | 91.13687 | 114.9440 |
| 470 | 91.98405 | 100.6368 | 108.5764 | 115.8151 | 122.4192 | 128.4653 | 91.48863 | 114.9812 |
| 471 | 92.27765 | 100.8113 | 108.6049 | 115.8042 | 122.3937 | 128.4259 | 91.81577 | 114.9768 |
| 472 | 92.56204 | 100.9825 | 108.6309 | 115.7729 | 122.3215 | 128.3144 | 92.13269 | 114.9638 |
| 473 | 92.83503 | 101.1467 | 108.6542 | 115.7234 | 122.2086 | 128.1411 | 92.43741 | 114.9429 |
| 474 | 93.09443 | 101.3006 | 108.6748 | 115.6577 | 122.0610 | 127.9160 | 92.72796 | 114.9147 |
| 475 | 93.33806 | 101.4404 | 108.6925 | 115.5779 | 121.8850 | 127.6495 | 93.00236 | 114.8796 |
| 476 | 93.56373 | 101.5628 | 108.7072 | 115.4862 | 121.6866 | 127.3516 | 93.25862 | 114.8384 |
| 477 | 93.76925 | 101.6641 | 108.7189 | 115.3847 | 121.4719 | 127.0326 | 93.49478 | 114.7915 |
| 478 | 93.95243 | 101.7408 | 108.7273 | 115.2754 | 121.2471 | 126.7027 | 93.70886 | 114.7397 |
| 479 | 94.11108 | 101.7894 | 108.7325 | 115.1605 | 121.0182 | 126.3720 | 93.89887 | 114.6833 |
| 480 | 94.24302 | 101.8064 | 108.7342 | 115.0421 | 120.7913 | 126.0507 | 94.06284 | 114.6231 |
| 481 | 94.35387 | 101.7982 | 108.7042 | 114.8955 | 120.5420 | 125.7123 | 94.20544 | 114.5298 |
| 482 | 94.45213 | 101.7751 | 108.6205 | 114.7002 | 120.2470 | 125.3288 | 94.33411 | 114.3805 |
| 483 | 94.53992 | 101.7398 | 108.4925 | 114.4648 | 119.9143 | 124.9082 | 94.45103 | 114.1847 |
| 484 | 94.61938 | 101.6947 | 108.3297 | 114.1979 | 119.5522 | 124.4585 | 94.55839 | 113.9522 |
| 485 | 94.69263 | 101.6426 | 108.1415 | 113.9081 | 119.1685 | 123.9877 | 94.65837 | 113.6925 |
| 486 | 94.76181 | 101.5858 | 107.9374 | 113.6039 | 118.7715 | 123.5036 | 94.75316 | 113.4155 |
| 487 | 94.82903 | 101.5270 | 107.7268 | 113.2940 | 118.3691 | 123.0144 | 94.84494 | 113.1306 |
| 488 | 94.89643 | 101.4688 | 107.5192 | 112.9869 | 117.9695 | 122.5280 | 94.93590 | 112.8477 |
| 489 | 94.96613 | 101.4137 | 107.3240 | 112.6911 | 117.5807 | 122.0523 | 95.02823 | 112.5764 |
| 490 | 95.04027 | 101.3642 | 107.1507 | 112.4154 | 117.2107 | 121.5954 | 95.12410 | 112.3263 |
| 491 | 95.11489 | 101.3139 | 106.9862 | 112.1472 | 116.8475 | 121.1449 | 95.21933 | 112.0842 |
| 492 | 95.18558 | 101.2563 | 106.8134 | 111.8710 | 116.4760 | 120.6857 | 95.30937 | 111.8327 |
| 493 | 95.25381 | 101.1945 | 106.6358 | 111.5901 | 116.0998 | 120.2217 | 95.39587 | 111.5754 |
| 494 | 95.32105 | 101.1314 | 106.4568 | 111.3080 | 115.7224 | 119.7566 | 95.48048 | 111.3154 |
| 495 | 95.38878 | 101.0699 | 106.2800 | 111.0282 | 115.3474 | 119.2940 | 95.56485 | 111.0564 |
| 496 | 95.45846 | 101.0130 | 106.1088 | 110.7541 | 114.9785 | 118.8379 | 95.65063 | 110.8017 |
| 497 | 95.53156 | 100.9636 | 105.9467 | 110.4891 | 114.6191 | 118.3919 | 95.73948 | 110.5546 |
| 498 | 95.60956 | 100.9246 | 105.7973 | 110.2367 | 114.2730 | 117.9599 | 95.83304 | 110.3187 |
| 499 | 95.69391 | 100.8991 | 105.6639 | 110.0003 | 113.9436 | 117.5455 | 95.93297 | 110.0973 |
| 500 | 95.78610 | 100.8899 | 105.5502 | 109.7834 | 113.6346 | 117.1525 | 96.04092 | 109.8938 |
| 501 | 95.88945 | 100.8940 | 105.4496 | 109.5814 | 113.3417 | 116.7768 | 96.15901 | 109.7042 |
| 502 | 96.00509 | 100.9056 | 105.3537 | 109.3872 | 113.0582 | 116.4114 | 96.28726 | 109.5217 |
| 503 | 96.13122 | 100.9238 | 105.2628 | 109.2006 | 112.7836 | 116.0560 | 96.42414 | 109.3461 |
| 504 | 96.26605 | 100.9476 | 105.1772 | 109.0215 | 112.5177 | 115.7103 | 96.56815 | 109.1772 |
| 505 | 96.40776 | 100.9760 | 105.0973 | 108.8496 | 112.2601 | 115.3737 | 96.71775 | 109.0147 |
| 506 | 96.55456 | 101.0081 | 105.0233 | 108.6847 | 112.0105 | 115.0461 | 96.87144 | 108.8584 |
| 507 | 96.70464 | 101.0429 | 104.9555 | 108.5266 | 111.7687 | 114.7271 | 97.02770 | 108.7079 |
| 508 | 96.85620 | 101.0795 | 104.8944 | 108.3751 | 111.5341 | 114.4162 | 97.18501 | 108.5631 |

| wavelength | sD50 | sD55 | sD60 | sD65 | sD70 | sD75 | sD50 | sD65 |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|
| 509 | 97.00743 | 101.1169 | 104.8401 | 108.2299 | 111.3067 | 114.1132 | 97.34186 | 108.4237 |
| 510 | 97.15655 | 101.1541 | 104.7931 | 108.0910 | 111.0859 | 113.8177 | 97.49671 | 108.2893 |
| 511 | 97.30740 | 101.1960 | 104.7523 | 107.9589 | 110.8729 | 113.5308 | 97.65314 | 108.1611 |
| 512 | 97.46409 | 101.2469 | 104.7159 | 107.8337 | 110.6680 | 113.2530 | 97.81474 | 108.0395 |
| 513 | 97.62516 | 101.3049 | 104.6831 | 107.7144 | 110.4701 | 112.9832 | 97.98002 | 107.9234 |
| 514 | 97.78914 | 101.3684 | 104.6532 | 107.5999 | 110.2782 | 112.7203 | 98.14753 | 107.8116 |
| 515 | 97.95457 | 101.4354 | 104.6254 | 107.4892 | 110.0911 | 112.4630 | 98.31579 | 107.7031 |
| 516 | 98.11998 | 101.5041 | 104.5989 | 107.3812 | 109.9077 | 112.2104 | 98.48333 | 107.5967 |
| 517 | 98.28390 | 101.5729 | 104.5729 | 107.2749 | 109.7269 | 111.9611 | 98.64868 | 107.4913 |
| 518 | 98.44488 | 101.6399 | 104.5465 | 107.1692 | 109.5476 | 111.7142 | 98.81037 | 107.3858 |
| 519 | 98.60144 | 101.7033 | 104.5191 | 107.0630 | 109.3687 | 111.4684 | 98.96693 | 107.2791 |
| 520 | 98.75213 | 101.7613 | 104.4898 | 106.9553 | 109.1890 | 111.2226 | 99.11688 | 107.1701 |
| 521 | 98.90023 | 101.8179 | 104.4601 | 106.8480 | 109.0106 | 110.9788 | 99.26395 | 107.0609 |
| 522 | 99.04915 | 101.8774 | 104.4318 | 106.7435 | 108.8357 | 110.7393 | 99.41185 | 106.9537 |
| 523 | 99.19765 | 101.9380 | 104.4041 | 106.6409 | 108.6636 | 110.5032 | 99.55911 | 106.8478 |
| 524 | 99.34446 | 101.9982 | 104.3766 | 106.5394 | 108.4934 | 110.2698 | 99.70426 | 106.7425 |
| 525 | 99.48832 | 102.0564 | 104.3487 | 106.4383 | 108.3244 | 110.0383 | 99.84582 | 106.6369 |
| 526 | 99.62798 | 102.1108 | 104.3198 | 106.3367 | 108.1557 | 109.8079 | 99.98231 | 106.5302 |
| 527 | 99.76217 | 102.1599 | 104.2894 | 106.2340 | 107.9866 | 109.5778 | 100.11231 | 106.4218 |
| 528 | 99.88964 | 102.2020 | 104.2568 | 106.1293 | 107.8163 | 109.3472 | 100.2342 | 106.3108 |
| 529 | 100.0091 | 102.2355 | 104.2216 | 106.0219 | 107.6440 | 109.1154 | 100.3467 | 106.1964 |
| 530 | 100.1194 | 102.2588 | 104.1831 | 105.9110 | 107.4688 | 108.8816 | 100.4482 | 106.0779 |
| 531 | 100.2286 | 102.2761 | 104.1413 | 105.7986 | 107.2934 | 108.6484 | 100.5464 | 105.9570 |
| 532 | 100.3430 | 102.2926 | 104.0966 | 105.6866 | 107.1199 | 108.4181 | 100.6479 | 105.8355 |
| 533 | 100.4588 | 102.3080 | 104.0486 | 105.5740 | 106.9471 | 108.1894 | 100.7495 | 105.7123 |
| 534 | 100.5719 | 102.3220 | 103.9970 | 105.4597 | 106.7736 | 107.9610 | 100.8480 | 105.5866 |
| 535 | 100.6785 | 102.3346 | 103.9414 | 105.3427 | 106.5983 | 107.7314 | 100.9401 | 105.4573 |
| 536 | 100.7745 | 102.3453 | 103.8817 | 105.2220 | 106.4199 | 107.4995 | 101.0226 | 105.3237 |
| 537 | 100.8561 | 102.3541 | 103.8174 | 105.0965 | 106.2372 | 107.2637 | 101.0924 | 105.1846 |
| 538 | 100.9192 | 102.3606 | 103.7484 | 104.9653 | 106.0488 | 107.0228 | 101.1462 | 105.0392 |
| 539 | 100.9600 | 102.3647 | 103.6741 | 104.8273 | 105.8536 | 106.7755 | 101.1809 | 104.8866 |
| 540 | 100.9745 | 102.3661 | 103.5945 | 104.6815 | 105.6502 | 106.5204 | 101.1931 | 104.7258 |
| 541 | 100.9732 | 102.3538 | 103.5041 | 104.5259 | 105.4382 | 106.2576 | 101.1891 | 104.5545 |
| 542 | 100.9695 | 102.3189 | 103.3990 | 104.3598 | 105.2180 | 105.9884 | 101.1775 | 104.3715 |
| 543 | 100.9635 | 102.2644 | 103.2808 | 104.1841 | 104.9903 | 105.7131 | 101.1590 | 104.1778 |
| 544 | 100.9554 | 102.1935 | 103.1509 | 103.9996 | 104.7555 | 105.4320 | 101.1343 | 103.9743 |
| 545 | 100.9452 | 102.1092 | 103.0111 | 103.8071 | 104.5141 | 105.1455 | 101.1043 | 103.7621 |
| 546 | 100.9331 | 102.0146 | 102.8629 | 103.6076 | 104.2666 | 104.8537 | 101.0695 | 103.5421 |
| 547 | 100.9193 | 101.9128 | 102.7079 | 103.4019 | 104.0135 | 104.5571 | 101.0307 | 103.3151 |
| 548 | 100.9038 | 101.8069 | 102.5477 | 103.1908 | 103.7554 | 104.2558 | 100.9886 | 103.0823 |
| 549 | 100.8868 | 101.7000 | 102.3838 | 102.9752 | 103.4926 | 103.9503 | 100.9440 | 102.8446 |
| 550 | 100.8685 | 101.5951 | 102.2180 | 102.7560 | 103.2259 | 103.6407 | 100.8975 | 102.6029 |

| Wavelength | sD50 | sD55 | sD60 | sD65 | sD70 | sD75 | sID50 | sID65 |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 551 | 100.8371 | 101.4837 | 102.0446 | 102.5293 | 102.9521 | 103.3249 | 100.8385 | 102.3530 |
| 552 | 100.7833 | 101.3567 | 101.8583 | 102.2916 | 102.6689 | 103.0011 | 100.7579 | 102.0912 |
| 553 | 100.7105 | 101.2164 | 101.6609 | 102.0443 | 102.3776 | 102.6702 | 100.6591 | 101.8189 |
| 554 | 100.6224 | 101.0650 | 101.4542 | 101.7890 | 102.0793 | 102.3335 | 100.5454 | 101.5379 |
| 555 | 100.5226 | 100.9048 | 101.2398 | 101.5271 | 101.7753 | 101.9920 | 100.4199 | 101.2494 |
| 556 | 100.4145 | 100.7381 | 101.0197 | 101.2601 | 101.4670 | 101.6467 | 100.2861 | 100.9552 |
| 557 | 100.3018 | 100.5671 | 100.7955 | 100.9894 | 101.1554 | 101.2989 | 100.1472 | 100.6568 |
| 558 | 100.1881 | 100.3942 | 100.5691 | 100.7166 | 100.8419 | 100.9494 | 100.0065 | 100.3556 |
| 559 | 100.0768 | 100.2215 | 100.3422 | 100.4430 | 100.5277 | 100.5995 | 99.86724 | 100.0532 |
| 560 | 99.97163 | 100.0513 | 100.1166 | 100.1701 | 100.2140 | 100.2502 | 99.73276 | 99.75113 |
| 561 | 99.86688 | 99.87934 | 99.88867 | 99.8949 | 99.89825 | 99.89906 | 99.59756 | 99.44616 |
| 562 | 99.75557 | 99.70079 | 99.65443 | 99.61394 | 99.57742 | 99.54368 | 99.45501 | 99.13477 |
| 563 | 99.63927 | 99.51704 | 99.41520 | 99.32844 | 99.25263 | 99.18499 | 99.30666 | 98.81816 |
| 564 | 99.51955 | 99.32953 | 99.17228 | 99.03956 | 98.92495 | 98.82395 | 99.15406 | 98.49753 |
| 565 | 99.39797 | 99.13967 | 98.92696 | 98.74851 | 98.59543 | 98.46152 | 98.99875 | 98.17406 |
| 566 | 99.27612 | 98.94888 | 98.68055 | 98.45644 | 98.26515 | 98.09864 | 98.84230 | 97.84897 |
| 567 | 99.15554 | 98.75859 | 98.43433 | 98.16454 | 97.93516 | 97.73629 | 98.68626 | 97.52344 |
| 568 | 99.03783 | 98.57022 | 98.18962 | 97.87399 | 97.60654 | 97.37541 | 98.53216 | 97.19868 |
| 569 | 98.92453 | 98.38518 | 97.94770 | 97.58597 | 97.28034 | 97.01697 | 98.38158 | 96.87589 |
| 570 | 98.81723 | 98.20490 | 97.70987 | 97.30166 | 96.95763 | 96.66192 | 98.23605 | 96.55625 |
| 571 | 98.71261 | 98.02673 | 97.47368 | 97.01872 | 96.63621 | 96.30818 | 98.09284 | 96.23746 |
| 572 | 98.60713 | 97.84770 | 97.23641 | 96.73466 | 96.31375 | 95.95358 | 97.94876 | 95.91697 |
| 573 | 98.50197 | 97.66875 | 96.99895 | 96.45034 | 95.99112 | 95.59899 | 97.80474 | 95.59568 |
| 574 | 98.39832 | 97.49081 | 96.76221 | 96.16665 | 95.66917 | 95.24523 | 97.66173 | 95.27446 |
| 575 | 98.29737 | 97.31484 | 96.52709 | 95.88447 | 95.34877 | 94.89316 | 97.52064 | 94.95418 |
| 576 | 98.20029 | 97.14177 | 96.29450 | 95.60469 | 95.03079 | 94.54361 | 97.38240 | 94.63574 |
| 577 | 98.10829 | 96.97255 | 96.06533 | 95.32818 | 94.71609 | 94.19744 | 97.24795 | 94.31999 |
| 578 | 98.02254 | 96.80811 | 95.84048 | 95.05584 | 94.40554 | 93.85549 | 97.11821 | 94.00784 |
| 579 | 97.94423 | 96.64941 | 95.62086 | 94.78855 | 94.10000 | 93.51859 | 96.99411 | 93.70014 |
| 580 | 97.87455 | 96.49737 | 95.40737 | 94.52718 | 93.80034 | 93.18760 | 96.87658 | 93.39779 |
| 581 | 97.80959 | 96.35039 | 95.19878 | 94.27065 | 93.50551 | 92.86150 | 96.76383 | 93.09979 |
| 582 | 97.74532 | 96.20639 | 94.99335 | 94.01731 | 93.21394 | 92.53876 | 96.65364 | 92.80458 |
| 583 | 97.68277 | 96.06557 | 94.79115 | 93.76723 | 92.92570 | 92.21945 | 96.54626 | 92.51225 |
| 584 | 97.62296 | 95.92811 | 94.59231 | 93.52050 | 92.64085 | 91.90363 | 96.44197 | 92.22287 |
| 585 | 97.56691 | 95.79422 | 94.39690 | 93.27718 | 92.35947 | 91.59137 | 96.34104 | 91.93649 |
| 586 | 97.51564 | 95.66410 | 94.20504 | 93.03734 | 92.08160 | 91.28273 | 96.24372 | 91.65320 |
| 587 | 97.47019 | 95.53795 | 94.01682 | 92.80106 | 91.80732 | 90.97777 | 96.15029 | 91.37306 |
| 588 | 97.43157 | 95.41596 | 93.83235 | 92.56841 | 91.53669 | 90.67657 | 96.06101 | 91.09614 |
| 589 | 97.40081 | 95.29834 | 93.65171 | 92.33946 | 91.26979 | 90.37918 | 95.97614 | 90.82251 |
| 590 | 97.37892 | 95.18529 | 93.47501 | 92.11429 | 91.00667 | 90.08567 | 95.89596 | 90.55223 |
| 591 | 97.36218 | 95.07671 | 93.30248 | 91.89318 | 90.74761 | 89.79631 | 95.82016 | 90.28562 |
| 592 | 97.34629 | 94.97213 | 93.13402 | 91.67611 | 90.49263 | 89.51109 | 95.74800 | 90.02269 |

| Wavelength | sD50 | sD55 | sD60 | sD65 | sD70 | sD75 | sID50 | sID65 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 593 | [97,33146] | [94,87110] | [92,96918] | [91,46268] | [90,24133] | [89,22964] | [95,67906] | [89,76308] |
| 594 | [97,31792] | [94,77321] | [92,80755] | [91,25249] | [89,99335] | [88,95162] | [95,61293] | [89,50645] |
| 595 | [97,30588] | [94,67802] | [92,64869] | [91,04514] | [89,74831] | [88,67667] | [95,54918] | [89,25244] |
| 596 | [97,29555] | [94,58512] | [92,49217] | [90,84022] | [89,50582] | [88,40443] | [95,48742] | [89,0007] |
| 597 | [97,28714] | [94,49408] | [92,33757] | [90,63733] | [89,26553] | [88,13456] | [95,42721] | [88,75088] |
| 598 | [97,28086] | [94,40447] | [92,18445] | [90,43607] | [89,02704] | [87,86669] | [95,36816] | [88,50262] |
| 599 | [97,27694] | [94,31586] | [92,03239] | [90,23604] | [88,78999] | [87,60047] | [95,30983] | [88,25557] |
| 600 | [97,27559] | [94,22784] | [91,88095] | [90,03684] | [88,55400] | [87,33554] | [95,25183] | [88,00938] |
| 601 | [97,27631] | [94,14102] | [91,73076] | [89,83902] | [88,31956] | [87,07238] | [95,19480] | [87,76451] |
| 602 | [97,27832] | [94,05614] | [91,58255] | [89,64327] | [88,08733] | [86,81157] | [95,13949] | [87,52155] |
| 603 | [97,28143] | [93,97294] | [91,43610] | [89,44939] | [87,85713] | [86,55295] | [95,08561] | [87,28036] |
| 604 | [97,28543] | [93,89117] | [91,29119] | [89,25721] | [87,62877] | [86,29635] | [95,03288] | [87,04079] |
| 605 | [97,29012] | [93,81055] | [91,14761] | [89,06651] | [87,40208] | [86,04161] | [94,98102] | [86,8027] |
| 606 | [97,29531] | [93,73084] | [91,00513] | [88,87711] | [87,17688] | [85,78855] | [94,92973] | [86,56594] |
| 607 | [97,30078] | [93,65177] | [90,86353] | [88,68882] | [86,95301] | [85,53702] | [94,87873] | [86,33037] |
| 608 | [97,30634] | [93,57310] | [90,72260] | [88,50144] | [86,73028] | [85,28684] | [94,82774] | [86,09584] |
| 609 | [97,31179] | [93,49455] | [90,58210] | [88,31478] | [86,50851] | [85,03785] | [94,77646] | [85,86221] |
| 610 | [97,31691] | [93,41587] | [90,44181] | [88,12864] | [86,28753] | [84,78988] | [94,72462] | [85,62933] |
| 611 | [97,32163] | [93,33561] | [90,30059] | [87,94200] | [86,06641] | [84,54207] | [94,67054] | [85,39623] |
| 612 | [97,32611] | [93,25320] | [90,15801] | [87,75448] | [85,84479] | [84,29408] | [94,61356] | [85,16250] |
| 613 | [97,33055] | [93,16976] | [90,01495] | [87,56686] | [85,62338] | [84,04657] | [94,55498] | [84,92886] |
| 614 | [97,33514] | [93,08640] | [89,87229] | [87,37990] | [85,40287] | [83,80018] | [94,49607] | [84,69602] |
| 615 | [97,34010] | [93,00422] | [89,73092] | [87,19439] | [85,18397] | [83,55555] | [94,43812] | [84,46471] |
| 616 | [97,34561] | [92,92434] | [89,59171] | [87,01109] | [84,96737] | [83,31334] | [94,38239] | [84,23562] |
| 617 | [97,35187] | [92,84787] | [89,45556] | [86,83080] | [84,75379] | [83,07418] | [94,33018] | [84,00949] |
| 618 | [97,35909] | [92,77590] | [89,32333] | [86,65427] | [84,54392] | [82,83872] | [94,28276] | [83,78702] |
| 619 | [97,36746] | [92,70956] | [89,19592] | [86,48229] | [84,33846] | [82,60760] | [94,24140] | [83,56893] |
| 620 | [97,37719] | [92,64995] | [89,07421] | [86,31562] | [84,13812] | [82,38148] | [94,20740] | [83,35593] |
| 621 | [97,39228] | [92,59457] | [88,95691] | [86,15330] | [83,94204] | [82,15955] | [94,17729] | [83,14725] |
| 622 | [97,41586] | [92,54048] | [88,84220] | [85,99381] | [83,74889] | [81,94060] | [94,14725] | [82,94159] |
| 623 | [97,44680] | [92,48814] | [88,73016] | [85,83720] | [83,55869] | [81,72464] | [94,11802] | [82,73893] |
| 624 | [97,48398] | [92,43803] | [88,62088] | [85,68346] | [83,37144] | [81,51170] | [94,09031] | [82,53923] |
| 625 | [97,52627] | [92,39061] | [88,51444] | [85,53263] | [83,18716] | [81,30177] | [94,06487] | [82,34245] |
| 626 | [97,57256] | [92,34635] | [88,41093] | [85,38473] | [83,00585] | [81,09490] | [94,04241] | [82,14856] |
| 627 | [97,62172] | [92,30571] | [88,31041] | [85,23977] | [82,82752] | [80,89108] | [94,02368] | [81,95752] |
| 628 | [97,67261] | [92,26915] | [88,21298] | [85,09778] | [82,65219] | [80,69033] | [94,00940] | [81,76929] |
| 629 | [97,72413] | [92,23715] | [88,11871] | [84,95878] | [82,47985] | [80,49268] | [94,00029] | [81,58384] |
| 630 | [97,77514] | [92,21016] | [88,02770] | [84,82278] | [82,31053] | [80,29814] | [93,99709] | [81,40113] |
| 631 | [97,83264] | [92,18813] | [87,94188] | [84,69189] | [82,14626] | [80,10865] | [93,99827] | [81,22329] |
| 632 | [97,90200] | [92,16998] | [87,86206] | [84,56713] | [81,98806] | [79,92517] | [94,00146] | [81,05146] |
| 633 | [97,97970] | [92,15470] | [87,78665] | [84,44690] | [81,83443] | [79,74626] | [94,00616] | [80,88411] |
| 634 | [98,06224] | [92,14127] | [87,71406] | [84,32963] | [81,68384] | [79,57048] | [94,01186] | [80,71972] |

| Wavelength | sD50 | sD55 | sD60 | sD65 | sD70 | sD75 | sID50 | sID65 |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 635 | 98.14608 | 92.12865 | 87.64267 | 84.21373 | 81.53477 | 79.39638 | 94.01808 | 80.55675 |
| 636 | 98.22771 | 92.11584 | 87.57090 | 84.09761 | 81.38571 | 79.22254 | 94.02429 | 80.39369 |
| 637 | 98.30360 | 92.10179 | 87.49715 | 83.97969 | 81.23514 | 79.04750 | 94.02999 | 80.22900 |
| 638 | 98.37025 | 92.08550 | 87.41981 | 83.85837 | 81.08155 | 78.86982 | 94.03469 | 80.06115 |
| 639 | 98.42412 | 92.06595 | 87.33729 | 83.73208 | 80.92341 | 78.68807 | 94.03788 | 79.88864 |
| 640 | 98.46170 | 92.04209 | 87.24799 | 83.59922 | 80.75921 | 78.50080 | 94.03906 | 79.70992 |
| 641 | 98.48958 | 92.01042 | 87.15154 | 83.45998 | 80.58931 | 78.30846 | 94.03195 | 79.52536 |
| 642 | 98.51639 | 91.96892 | 87.04907 | 83.31592 | 80.41539 | 78.11275 | 94.01182 | 79.33667 |
| 643 | 98.54169 | 91.91884 | 86.94121 | 83.16756 | 80.23791 | 77.91406 | 93.98047 | 79.14428 |
| 644 | 98.56504 | 91.86144 | 86.82861 | 83.01541 | 80.05731 | 77.71281 | 93.93968 | 78.94865 |
| 645 | 98.58600 | 91.79797 | 86.71190 | 82.85997 | 79.87404 | 77.50940 | 93.89126 | 78.75024 |
| 646 | 98.60414 | 91.72968 | 86.59172 | 82.70177 | 79.68855 | 77.30424 | 93.83699 | 78.54948 |
| 647 | 98.61902 | 91.65784 | 86.46870 | 82.54131 | 79.50130 | 77.09773 | 93.77867 | 78.34684 |
| 648 | 98.63019 | 91.58369 | 86.34348 | 82.37910 | 79.31274 | 76.89028 | 93.71809 | 78.14277 |
| 649 | 98.63721 | 91.50849 | 86.21671 | 82.21566 | 79.12330 | 76.68230 | 93.65705 | 77.93771 |
| 650 | 98.63965 | 91.43349 | 86.08902 | 82.05149 | 78.93345 | 76.47420 | 93.59734 | 77.73211 |
| 651 | 98.63522 | 91.35549 | 85.95832 | 81.88476 | 78.74148 | 76.26435 | 93.53469 | 77.52441 |
| 652 | 98.62267 | 91.27105 | 85.82268 | 81.71387 | 78.54592 | 76.05141 | 93.46426 | 77.31323 |
| 653 | 98.60308 | 91.18110 | 85.68294 | 81.53967 | 78.34763 | 75.83622 | 93.38700 | 77.09931 |
| 654 | 98.57754 | 91.08654 | 85.53995 | 81.36302 | 78.14747 | 75.61962 | 93.30384 | 76.88343 |
| 655 | 98.54712 | 90.98831 | 85.39456 | 81.18476 | 77.94629 | 75.40244 | 93.21572 | 76.66634 |
| 656 | 98.51293 | 90.88730 | 85.24761 | 81.00575 | 77.74495 | 75.18553 | 93.12359 | 76.44878 |
| 657 | 98.47604 | 90.78445 | 85.09995 | 80.82685 | 77.54429 | 74.96972 | 93.02839 | 76.23152 |
| 658 | 98.43754 | 90.68067 | 84.95243 | 80.64891 | 77.34517 | 74.75585 | 92.93107 | 76.01531 |
| 659 | 98.39851 | 90.57687 | 84.80590 | 80.47278 | 77.14845 | 74.54476 | 92.83255 | 75.80092 |
| 660 | 98.36005 | 90.47398 | 84.66119 | 80.29931 | 76.95497 | 74.33728 | 92.73379 | 75.58908 |
| 661 | 98.32088 | 90.37318 | 84.51983 | 80.12997 | 76.76609 | 74.13470 | 92.63534 | 75.38128 |
| 662 | 98.27868 | 90.27414 | 84.38178 | 79.96468 | 76.58167 | 73.93682 | 92.53635 | 75.17755 |
| 663 | 98.23300 | 90.17550 | 84.24555 | 79.80197 | 76.40030 | 73.74228 | 92.43567 | 74.97646 |
| 664 | 98.18335 | 90.07591 | 84.10967 | 79.64039 | 76.22057 | 73.54974 | 92.33212 | 74.77661 |
| 665 | 98.12926 | 89.97401 | 83.97265 | 79.47850 | 76.04109 | 73.35782 | 92.22455 | 74.5766 |
| 666 | 98.07028 | 89.86843 | 83.83303 | 79.31482 | 75.86044 | 73.16518 | 92.11180 | 74.37501 |
| 667 | 98.00591 | 89.75782 | 83.68931 | 79.14792 | 75.67723 | 72.97046 | 91.99270 | 74.17043 |
| 668 | 97.93570 | 89.64083 | 83.54003 | 78.97634 | 75.49005 | 72.77229 | 91.86609 | 73.96145 |
| 669 | 97.85917 | 89.51608 | 83.38371 | 78.79862 | 75.29750 | 72.56933 | 91.73081 | 73.74666 |
| 670 | 97.77586 | 89.38223 | 83.21886 | 78.61330 | 75.09816 | 72.36020 | 91.58571 | 73.52466 |
| 671 | 97.67689 | 89.23628 | 83.04447 | 78.42015 | 74.89214 | 72.14515 | 91.42603 | 73.29556 |
| 672 | 97.55542 | 89.07698 | 82.86100 | 78.22027 | 74.68077 | 71.92561 | 91.24894 | 73.06071 |
| 673 | 97.41404 | 88.90561 | 82.66926 | 78.01423 | 74.46453 | 71.70200 | 91.05609 | 72.82053 |
| 674 | 97.25530 | 88.72344 | 82.47001 | 77.80260 | 74.24389 | 71.47477 | 90.84917 | 72.57547 |
| 675 | 97.08180 | 88.53176 | 82.26404 | 77.58597 | 74.01935 | 71.24436 | 90.62985 | 72.32593 |
| 676 | 96.89609 | 88.33183 | 82.05214 | 77.36490 | 73.79137 | 71.01119 | 90.39978 | 72.07235 |

| Wavelength | sD50 | sD55 | sD60 | sD65 | sD70 | sD75 | sD50 | sD65 |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 677 | 196.70076 | 188.12493 | 181.83509 | 177.13996 | 173.56044 | 170.77571 | 190.16065 | 171.81515 |
| 678 | 196.49837 | 187.91233 | 181.61367 | 176.91173 | 173.32703 | 170.53834 | 189.91412 | 171.55475 |
| 679 | 196.29150 | 187.69531 | 181.38867 | 176.68078 | 173.09162 | 170.29954 | 189.66186 | 171.29160 |
| 680 | 196.08273 | 187.47515 | 181.16087 | 176.44769 | 172.85470 | 170.05972 | 189.40555 | 171.02610 |
| 681 | 195.86033 | 187.24346 | 180.92342 | 176.20634 | 172.61052 | 169.81336 | 189.13578 | 170.75306 |
| 682 | 195.61406 | 186.99377 | 180.67144 | 175.95261 | 172.35533 | 169.55688 | 188.84482 | 170.46902 |
| 683 | 195.34870 | 186.73015 | 180.40866 | 175.69005 | 172.09257 | 169.29366 | 188.53682 | 170.17708 |
| 684 | 195.06901 | 186.45671 | 180.13885 | 175.42222 | 171.82570 | 169.02710 | 188.21593 | 169.88030 |
| 685 | 194.77976 | 186.17753 | 179.86572 | 175.15266 | 171.55817 | 168.76060 | 187.88630 | 169.58176 |
| 686 | 194.48573 | 185.89672 | 179.59303 | 174.88494 | 171.29341 | 168.49753 | 187.55210 | 169.28454 |
| 687 | 194.19170 | 185.61836 | 179.32451 | 174.62259 | 171.03489 | 168.24129 | 187.21746 | 168.99171 |
| 688 | 193.90243 | 185.34655 | 179.06390 | 174.36918 | 170.78605 | 167.99527 | 186.88654 | 168.70635 |
| 689 | 193.62271 | 185.08538 | 178.81495 | 174.12825 | 170.55034 | 167.76287 | 186.56350 | 168.43155 |
| 690 | 193.35729 | 184.83895 | 178.58139 | 173.90335 | 170.33120 | 167.54746 | 186.25249 | 168.17037 |
| 691 | 193.10122 | 184.60261 | 178.35850 | 173.68952 | 170.12339 | 167.34354 | 185.94913 | 167.91888 |
| 692 | 192.84672 | 184.36934 | 178.13943 | 173.47985 | 169.91986 | 167.14392 | 185.64666 | 167.67141 |
| 693 | 192.59434 | 184.13965 | 177.92474 | 173.27499 | 169.72137 | 166.94944 | 185.34562 | 167.42845 |
| 694 | 192.34459 | 183.91404 | 177.71501 | 173.07562 | 169.52869 | 166.76098 | 185.04657 | 167.19047 |
| 695 | 192.09803 | 183.69303 | 177.51079 | 172.88239 | 169.34258 | 166.57941 | 184.75006 | 166.95794 |
| 696 | 191.85519 | 183.47712 | 177.31266 | 172.69595 | 169.16382 | 166.40558 | 184.45663 | 166.73135 |
| 697 | 191.61662 | 183.26683 | 177.12118 | 172.51699 | 168.99315 | 166.24035 | 184.16685 | 166.51117 |
| 698 | 191.38284 | 183.06265 | 176.93692 | 172.34614 | 168.83135 | 166.08460 | 183.88126 | 166.29788 |
| 699 | 191.15439 | 182.86511 | 176.76045 | 172.18408 | 168.67918 | 165.93919 | 183.60042 | 166.09195 |
| 700 | 190.93182 | 182.67470 | 176.59232 | 172.03147 | 168.53740 | 165.80497 | 183.32487 | 165.89387 |
| 701 | 190.71832 | 182.49430 | 176.43496 | 171.89021 | 168.40746 | 165.68296 | 183.05841 | 165.70700 |
| 702 | 190.51492 | 182.32467 | 176.28865 | 171.76008 | 168.28861 | 165.57197 | 182.80246 | 165.53233 |
| 703 | 190.31894 | 182.16313 | 176.15077 | 171.63852 | 168.17836 | 165.46957 | 182.55402 | 165.36678 |
| 704 | 190.12766 | 182.00699 | 176.01868 | 171.52295 | 168.07422 | 165.37333 | 182.31007 | 165.20725 |
| 705 | 189.93841 | 181.85358 | 175.88975 | 171.41083 | 167.97369 | 165.28082 | 182.06762 | 165.05066 |
| 706 | 189.74848 | 181.70021 | 175.76136 | 171.29959 | 167.87429 | 165.18962 | 181.82364 | 164.89392 |
| 707 | 189.55517 | 181.54421 | 175.63089 | 171.18666 | 167.77352 | 165.09731 | 181.57514 | 164.73394 |
| 708 | 189.35580 | 181.38290 | 175.49569 | 171.06948 | 167.66889 | 165.00144 | 181.31911 | 164.56763 |
| 709 | 189.14766 | 181.21360 | 175.35315 | 170.94550 | 167.55790 | 164.89960 | 181.05253 | 164.39191 |
| 710 | 188.92806 | 181.03362 | 175.20063 | 170.81215 | 167.43807 | 164.78937 | 180.77240 | 164.20369 |
| 711 | 188.69716 | 180.84364 | 175.03916 | 170.67070 | 167.31083 | 164.67233 | 180.47605 | 164.00152 |
| 712 | 188.45748 | 180.64648 | 174.87173 | 170.52425 | 167.17938 | 164.55170 | 180.16469 | 163.78739 |
| 713 | 188.20992 | 180.44275 | 174.69873 | 170.37302 | 167.04379 | 164.42748 | 179.84113 | 163.56330 |
| 714 | 187.95537 | 180.23303 | 174.52053 | 170.21724 | 166.90417 | 164.29967 | 179.50817 | 163.33127 |
| 715 | 187.69470 | 180.01790 | 174.33751 | 170.05711 | 166.76062 | 164.16827 | 179.16865 | 163.09331 |
| 716 | 187.42881 | 179.79796 | 174.15004 | 169.89286 | 166.61322 | 164.03328 | 178.82537 | 162.85146 |
| 717 | 187.15857 | 179.57380 | 173.95850 | 169.72470 | 166.46208 | 163.89470 | 178.48114 | 162.60771 |
| 718 | 186.88488 | 179.34601 | 173.76327 | 169.55285 | 166.30729 | 163.75253 | 178.13879 | 162.36409 |

| Wavelength | sD50 | sD55 | sD60 | sD65 | sD70 | sD75 | sID50 | sID65 |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 719 | 86.60862 | 79.11518 | 73.56472 | 69.37753 | 66.14894 | 63.60676 | 77.80111 | 62.12261 |
| 720 | 86.33067 | 78.88189 | 73.36323 | 69.19895 | 65.98714 | 63.45740 | 77.47094 | 61.88529 |
| 721 | 86.04730 | 78.64285 | 73.15580 | 69.01435 | 65.81927 | 63.30199 | 77.14364 | 61.64823 |
| 722 | 85.75540 | 78.39548 | 72.94021 | 68.82174 | 65.64356 | 63.13890 | 76.81374 | 61.40716 |
| 723 | 85.45676 | 78.14137 | 72.71792 | 68.62252 | 65.46133 | 62.96941 | 76.48273 | 61.16357 |
| 724 | 85.15318 | 77.88214 | 72.49044 | 68.41807 | 65.27391 | 62.79478 | 76.15213 | 60.91893 |
| 725 | 84.84647 | 77.61942 | 72.25924 | 68.20980 | 65.08262 | 62.61629 | 75.82343 | 60.67471 |
| 726 | 84.53842 | 77.35481 | 72.02581 | 67.99909 | 64.88878 | 62.43520 | 75.49816 | 60.4324 |
| 727 | 84.23084 | 77.08993 | 71.79164 | 67.78734 | 64.69373 | 62.25279 | 75.17780 | 60.19346 |
| 728 | 83.92553 | 76.82639 | 71.55821 | 67.57595 | 64.49877 | 62.07033 | 74.86387 | 59.95938 |
| 729 | 83.62428 | 76.56581 | 71.32701 | 67.36631 | 64.30525 | 61.88908 | 74.55788 | 59.73162 |
| 730 | 83.32890 | 76.30980 | 71.09953 | 67.15980 | 64.11447 | 61.71031 | 74.26132 | 59.51168 |
| 731 | 83.03402 | 76.05357 | 70.87137 | 66.95235 | 63.92258 | 61.53034 | 73.97272 | 59.29813 |
| 732 | 82.73474 | 75.79276 | 70.63855 | 66.74022 | 63.72606 | 61.34581 | 73.68947 | 59.08850 |
| 733 | 82.43363 | 75.52967 | 70.40317 | 66.52538 | 63.52674 | 61.15845 | 73.41138 | 58.88266 |
| 734 | 82.13324 | 75.26660 | 70.16734 | 66.30977 | 63.32646 | 60.97003 | 73.13827 | 58.68049 |
| 735 | 81.83614 | 75.00584 | 69.93315 | 66.09535 | 63.12706 | 60.78227 | 72.86997 | 58.48186 |
| 736 | 81.54487 | 74.74969 | 69.70272 | 65.88408 | 62.93039 | 60.59693 | 72.60629 | 58.28666 |
| 737 | 81.26200 | 74.50043 | 69.47813 | 65.67792 | 62.73827 | 60.41576 | 72.34705 | 58.09476 |
| 738 | 80.99007 | 74.26038 | 69.26149 | 65.47881 | 62.55256 | 60.24050 | 72.09208 | 57.90603 |
| 739 | 80.73166 | 74.03181 | 69.05491 | 65.28871 | 62.37508 | 60.07289 | 71.84118 | 57.72036 |
| 740 | 80.48930 | 73.81703 | 68.86049 | 65.10957 | 62.20768 | 59.91468 | 71.59418 | 57.53761 |
| 741 | 80.25758 | 73.61148 | 68.67427 | 64.93791 | 62.04720 | 59.76297 | 71.35120 | 57.35796 |
| 742 | 80.03014 | 73.40970 | 68.49145 | 64.76935 | 61.88961 | 59.61400 | 71.11236 | 57.18150 |
| 743 | 79.80818 | 73.21264 | 68.31280 | 64.60458 | 61.73552 | 59.46830 | 70.87746 | 57.00803 |
| 744 | 79.59287 | 73.02125 | 68.13913 | 64.44425 | 61.58549 | 59.32638 | 70.64630 | 56.83737 |
| 745 | 79.38540 | 72.83649 | 67.97121 | 64.28905 | 61.44011 | 59.18876 | 70.41868 | 56.66930 |
| 746 | 79.18695 | 72.65931 | 67.80983 | 64.13964 | 61.29996 | 59.05594 | 70.19440 | 56.50363 |
| 747 | 78.99870 | 72.49066 | 67.65578 | 63.99668 | 61.16563 | 58.92844 | 69.97326 | 56.34017 |
| 748 | 78.82185 | 72.33150 | 67.50986 | 63.86086 | 61.03769 | 58.80678 | 69.75506 | 56.17871 |
| 749 | 78.65756 | 72.18277 | 67.37285 | 63.73284 | 60.91672 | 58.69147 | 69.53961 | 56.01906 |
| 750 | 78.50703 | 72.04542 | 67.24553 | 63.61329 | 60.80332 | 58.58302 | 69.32671 | 55.86101 |
| 751 | 78.37084 | 71.92024 | 67.12880 | 63.50316 | 60.69845 | 58.48244 | 69.11628 | 55.70466 |
| 752 | 78.24702 | 71.80582 | 67.02163 | 63.40169 | 60.60156 | 58.38931 | 68.90843 | 55.55020 |
| 753 | 78.13294 | 71.69986 | 66.92198 | 63.30703 | 60.51093 | 58.30201 | 68.70317 | 55.39762 |
| 754 | 78.02597 | 71.60007 | 66.82779 | 63.21730 | 60.42483 | 58.21893 | 68.50054 | 55.24687 |
| 755 | 77.92345 | 71.50415 | 66.73702 | 63.13065 | 60.34154 | 58.13845 | 68.30057 | 55.09793 |
| 756 | 77.82275 | 71.40979 | 66.64761 | 63.04520 | 60.25934 | 58.05895 | 68.10327 | 54.95077 |
| 757 | 77.72125 | 71.31469 | 66.55753 | 62.95910 | 60.17649 | 57.97882 | 67.90868 | 54.80536 |
| 758 | 77.61628 | 71.21657 | 66.46470 | 62.87048 | 60.09128 | 57.89643 | 67.71684 | 54.66168 |
| 759 | 77.50523 | 71.11311 | 66.36709 | 62.77747 | 60.00198 | 57.81018 | 67.52775 | 54.51969 |
| 760 | 77.38545 | 71.00202 | 66.26265 | 62.67822 | 59.90686 | 57.71844 | 67.34147 | 54.37936 |

| Wavelength | sD50 | sD55 | sD60 | sD65 | sD70 | sD75 | sID50 | sID65 |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 761 | 77.25806 | 70.88427 | 66.15223 | 62.57348 | 59.80662 | 57.62183 | 67.15727 | 54.24031 |
| 762 | 77.12625 | 70.76267 | 66.03834 | 62.46551 | 59.70332 | 57.52229 | 66.97467 | 54.10231 |
| 763 | 76.99053 | 70.63766 | 65.92138 | 62.35471 | 59.59735 | 57.42019 | 66.79401 | 53.96557 |
| 764 | 76.85141 | 70.50969 | 65.80175 | 62.24146 | 59.48907 | 57.31588 | 66.61561 | 53.83029 |
| 765 | 76.70938 | 70.37919 | 65.67987 | 62.12613 | 59.37885 | 57.20971 | 66.43981 | 53.69670 |
| 766 | 76.56495 | 70.24661 | 65.55613 | 62.00911 | 59.26705 | 57.10206 | 66.26694 | 53.56500 |
| 767 | 76.41861 | 70.11239 | 65.43094 | 61.89078 | 59.15404 | 56.99328 | 66.09735 | 53.43541 |
| 768 | 76.27087 | 69.97698 | 65.30471 | 61.77152 | 59.04020 | 56.88372 | 65.93136 | 53.30814 |
| 769 | 76.12223 | 69.84082 | 65.17785 | 61.65172 | 58.92588 | 56.77376 | 65.76931 | 53.18340 |
| 770 | 75.97320 | 69.70434 | 65.05075 | 61.53175 | 58.81146 | 56.66375 | 65.61153 | 53.06140 |
| 771 | 75.82025 | 69.56442 | 64.92054 | 61.40894 | 58.69440 | 56.55126 | 65.45728 | 52.94171 |
| 772 | 75.66088 | 69.41880 | 64.78518 | 61.28138 | 58.57290 | 56.43456 | 65.30567 | 52.82380 |
| 773 | 75.49708 | 69.26929 | 64.64633 | 61.15061 | 58.44840 | 56.31504 | 65.15677 | 52.70770 |
| 774 | 75.33086 | 69.11770 | 64.50562 | 61.01816 | 58.32237 | 56.19409 | 65.01070 | 52.59349 |
| 775 | 75.16423 | 68.96581 | 64.36472 | 60.88559 | 58.19626 | 56.07310 | 64.86754 | 52.48120 |
| 776 | 74.99918 | 68.81544 | 64.22527 | 60.75443 | 58.07152 | 55.95345 | 64.72740 | 52.37090 |
| 777 | 74.83772 | 68.66838 | 64.08893 | 60.62622 | 57.94962 | 55.83654 | 64.59036 | 52.26264 |
| 778 | 74.68184 | 68.52643 | 63.95734 | 60.50250 | 57.83200 | 55.72376 | 64.45653 | 52.15646 |
| 779 | 74.53356 | 68.39139 | 63.83217 | 60.38482 | 57.72013 | 55.61649 | 64.32601 | 52.05243 |
| 780 | 74.39486 | 68.26507 | 63.71507 | 60.27471 | 57.61545 | 55.51613 | 64.19887 | 51.95059 |
| 781 | 74.26306 | 68.14500 | 63.60375 | 60.17004 | 57.51595 | 55.42072 | | |
| 782 | 74.13427 | 68.02769 | 63.49500 | 60.06779 | 57.41875 | 55.32752 | | |
| 783 | 74.00875 | 67.91336 | 63.38902 | 59.96815 | 57.32404 | 55.23673 | | |
| 784 | 73.88674 | 67.80225 | 63.28603 | 59.87134 | 57.23202 | 55.14852 | | |
| 785 | 73.76848 | 67.69458 | 63.18625 | 59.77756 | 57.14290 | 55.06309 | | |
| 786 | 73.65423 | 67.59058 | 63.08989 | 59.68701 | 57.05686 | 54.98064 | | |
| 787 | 73.54424 | 67.49047 | 62.99717 | 59.59990 | 56.97411 | 54.90135 | | |
| 788 | 73.43875 | 67.39450 | 62.90830 | 59.51643 | 56.89484 | 54.82542 | | |
| 789 | 73.33801 | 67.30288 | 62.82349 | 59.43680 | 56.81925 | 54.75304 | | |
| 790 | 73.24227 | 67.21584 | 62.74296 | 59.36123 | 56.74754 | 54.68439 | | |
| 791 | 73.15050 | 67.13244 | 62.66581 | 59.28884 | 56.67886 | 54.61867 | | |
| 792 | 73.06159 | 67.05162 | 62.59105 | 59.21869 | 56.61231 | 54.55498 | | |
| 793 | 72.97558 | 66.97346 | 62.51875 | 59.15086 | 56.54796 | 54.49340 | | |
| 794 | 72.89255 | 66.89801 | 62.44897 | 59.08540 | 56.48587 | 54.43400 | | |
| 795 | 72.81256 | 66.82535 | 62.38178 | 59.02240 | 56.42612 | 54.37685 | | |
| 796 | 72.73568 | 66.75553 | 62.31726 | 58.96192 | 56.36879 | 54.32203 | | |
| 797 | 72.66197 | 66.68864 | 62.25548 | 58.90403 | 56.31395 | 54.26961 | | |
| 798 | 72.59150 | 66.62474 | 62.19649 | 58.84880 | 56.26166 | 54.21966 | | |
| 799 | 72.52434 | 66.56389 | 62.14038 | 58.79631 | 56.21200 | 54.17227 | | |
| 800 | 72.46054 | 66.50616 | 62.08721 | 58.74662 | 56.16504 | 54.12749 | | |
| 801 | 72.39931 | 66.45078 | 62.03623 | 58.69901 | 56.12007 | 54.08464 | | |
| 802 | 72.33989 | 66.39704 | 61.98675 | 58.65281 | 56.07642 | 54.04303 | | |

| Wavelength | sD50 | sD55 | sD60 | sD65 | sD70 | sD75 | sID50 | sID65 |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|-------|
| 803 | 72.28241 | 66.34506 | 61.93891 | 58.60812 | 56.03422 | 54.00282 | | |
| 804 | 72.22700 | 66.29498 | 61.89283 | 58.56511 | 55.99360 | 53.96412 | | |
| 805 | 72.17381 | 66.24693 | 61.84864 | 58.52388 | 55.95470 | 53.92708 | | |
| 806 | 72.12295 | 66.20103 | 61.80648 | 58.48459 | 55.91765 | 53.89183 | | |
| 807 | 72.07457 | 66.15743 | 61.76648 | 58.44735 | 55.88259 | 53.85851 | | |
| 808 | 72.02880 | 66.11626 | 61.72877 | 58.41231 | 55.84965 | 53.82725 | | |
| 809 | 71.98577 | 66.07764 | 61.69349 | 58.37959 | 55.81895 | 53.79819 | | |
| 810 | 71.94562 | 66.04171 | 61.66076 | 58.34934 | 55.79065 | 53.77146 | | |
| 811 | 71.90706 | 66.00724 | 61.62938 | 58.32034 | 55.76353 | 53.74587 | | |
| 812 | 71.86901 | 65.97318 | 61.59832 | 58.29159 | 55.73661 | 53.72040 | | |
| 813 | 71.83192 | 65.93995 | 61.56801 | 58.26352 | 55.71030 | 53.69550 | | |
| 814 | 71.79622 | 65.90799 | 61.53887 | 58.23655 | 55.68502 | 53.67158 | | |
| 815 | 71.76236 | 65.87773 | 61.51132 | 58.21109 | 55.66119 | 53.64907 | | |
| 816 | 71.73077 | 65.84959 | 61.48578 | 58.18756 | 55.63925 | 53.62840 | | |
| 817 | 71.70191 | 65.82400 | 61.46268 | 58.16638 | 55.61960 | 53.60999 | | |
| 818 | 71.67620 | 65.80139 | 61.44244 | 58.14798 | 55.60268 | 53.59427 | | |
| 819 | 71.65409 | 65.78218 | 61.42547 | 58.13278 | 55.58889 | 53.58165 | | |
| 820 | 71.63603 | 65.76681 | 61.41220 | 58.12119 | 55.57867 | 53.57258 | | |
| 821 | 71.62021 | 65.75357 | 61.40103 | 58.11166 | 55.57050 | 53.56555 | | |
| 822 | 71.60474 | 65.74065 | 61.39018 | 58.10248 | 55.56268 | 53.55887 | | |
| 823 | 71.58992 | 65.72828 | 61.37987 | 58.09380 | 55.55533 | 53.55261 | | |
| 824 | 71.57604 | 65.71674 | 61.37029 | 58.08578 | 55.54856 | 53.54689 | | |
| 825 | 71.56340 | 65.70628 | 61.36164 | 58.07856 | 55.54250 | 53.54178 | | |
| 826 | 71.55229 | 65.69714 | 61.35412 | 58.07231 | 55.53727 | 53.53739 | | |
| 827 | 71.54301 | 65.68959 | 61.34792 | 58.06717 | 55.53299 | 53.53382 | | |
| 828 | 71.53585 | 65.68389 | 61.34325 | 58.06331 | 55.52979 | 53.53114 | | |
| 829 | 71.53112 | 65.68028 | 61.34030 | 58.06089 | 55.52777 | 53.52947 | | |
| 830 | 71.52910 | 65.67901 | 61.33927 | 58.06004 | 55.52708 | 53.52889 | | |

>

ANNEXE IV

SPECTRAL POWER DISTRIBUTION OF SPRAGUE INTERPOLATED DAYLIGHT ILLUMINANTS: D₅₀, D₅₅, D₆₀, D₆₅, D₇₀ and D₇₅

| wave-length / nm | D50 | D55 | D60 | D65 | D70 | D75 |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 300 | 0.01913806 | 0.02420002 | 0.02918800 | 0.03397657 | 0.03850179 | 0.04275381 |
| 301 | 0.13369238 | 0.05055179 | 0.01859396 | 0.01859087 | 0.03839890 | 0.07039234 |
| 302 | 0.25076110 | 0.08515769 | 0.02018581 | 0.01810718 | 0.05508123 | 0.11612389 |
| 303 | 0.37691405 | 0.13551555 | 0.04510241 | 0.04883375 | 0.11082311 | 0.20855889 |
| 304 | 0.51860929 | 0.21338922 | 0.11088414 | 0.13419317 | 0.23482327 | 0.38247030 |
| 305 | 0.68200874 | 0.33304378 | 0.23881969 | 0.30162693 | 0.45995854 | 0.67558091 |
| 306 | 0.87279384 | 0.50948079 | 0.45129291 | 0.57949989 | 0.81952556 | 1.12535055 |
| 307 | 1.09598111 | 0.75667356 | 0.76912957 | 0.99400480 | 1.34401249 | 1.76576339 |
| 308 | 1.35573786 | 1.08580238 | 1.20894418 | 1.56606681 | 2.05783076 | 2.62411516 |
| 309 | 1.65519775 | 1.50348976 | 1.78048680 | 2.30824798 | 2.97607673 | 3.71780048 |
| 310 | 1.99627645 | 2.01003568 | 2.48398985 | 3.22165179 | 4.10128148 | 5.05110004 |
| 311 | 2.38088411 | 2.60360029 | 3.31654690 | 4.30396172 | 5.43272816 | 6.62550407 |
| 312 | 2.81362174 | 3.29440233 | 4.29360062 | 5.57544420 | 6.99511808 | 8.46979752 |
| 313 | 3.29572461 | 4.08424284 | 5.41770120 | 7.03948621 | 8.79270497 | 10.58909988 |
| 314 | 3.82444283 | 4.96343040 | 6.67384872 | 8.67693188 | 10.80301279 | 12.95822556 |
| 315 | 4.39421392 | 5.91439226 | 8.03501510 | 10.45313665 | 12.98514279 | 15.53103634 |
| 316 | 4.99783554 | 6.91528549 | 9.46766603 | 12.32502142 | 15.28808043 | 18.24979385 |
| 317 | 5.62763813 | 7.94360822 | 10.93728286 | 14.24812674 | 17.65900248 | 21.05451195 |
| 318 | 6.27665755 | 8.97981073 | 12.41388456 | 16.18366691 | 20.05158400 | 23.89230924 |
| 319 | 6.93980779 | 10.01090669 | 13.87754963 | 18.10558417 | 22.43430534 | 26.72676145 |
| 320 | 7.61505360 | 11.03408430 | 15.32393801 | 20.00760288 | 24.79875915 | 29.54725393 |
| 321 | 8.30554327 | 12.05833314 | 16.76687773 | 21.90763274 | 27.16634860 | 32.37822668 |
| 322 | 9.01785697 | 13.09132185 | 18.21845390 | 23.82405178 | 29.56272430 | 35.25305933 |
| 323 | 9.75080049 | 14.12984701 | 19.67390425 | 25.75085959 | 31.98088276 | 38.16391860 |
| 324 | 10.49555919 | 15.16220751 | 21.11521166 | 27.66184421 | 34.38549137 | 41.06597216 |
| 325 | 11.23833646 | 16.17126196 | 22.51588095 | 29.51781137 | 36.72295335 | 43.89046789 |
| 326 | 11.96299222 | 17.13748628 | 23.84571561 | 31.27381381 | 38.93147263 | 46.55781305 |
| 327 | 12.65368138 | 18.04203111 | 25.07559455 | 32.88638058 | 40.95111881 | 48.99065349 |
| 328 | 13.29749237 | 18.86977935 | 26.18224884 | 34.32074637 | 42.73389210 | 51.12695288 |
| 329 | 13.88708558 | 19.61240361 | 27.15303844 | 35.55808077 | 44.25378821 | 52.93307187 |
| 330 | 14.42333189 | 20.27142373 | 27.99072898 | 36.60271761 | 45.51686329 | 54.41684733 |
| 331 | 14.91148619 | 20.85186242 | 28.70321123 | 37.46720235 | 46.54128937 | 55.60256750 |
| 332 | 15.34375557 | 21.33905719 | 29.26669758 | 38.11754069 | 47.28249267 | 56.43508695 |
| 333 | 15.71765339 | 21.72957861 | 29.67588811 | 38.54605896 | 47.73018305 | 56.90140483 |
| 334 | 16.03966295 | 22.03621057 | 29.95189302 | 38.78316099 | 47.92438655 | 57.05115568 |
| 335 | 16.32232776 | 22.28261915 | 30.13352569 | 38.88477269 | 47.93886063 | 56.97597332 |
| 336 | 16.58134183 | 22.49802153 | 30.26859580 | 38.91978649 | 47.86450924 | 56.78885486 |
| 337 | 16.83263993 | 22.71185495 | 30.40520240 | 38.95750593 | 47.79279804 | 56.60352463 |
| 338 | 17.08948785 | 22.94844559 | 30.58302704 | 39.05509012 | 47.79916951 | 56.51379814 |
| 339 | 17.35957270 | 23.22167747 | 30.82462682 | 39.24499633 | 47.92645808 | 56.57294607 |

| wave-length / nm | D50 | D55 | D60 | D65 | D70 | D75 |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 340 | 17.64209316 | 23.52966141 | 31.12672751 | 39.52243444 | 48.16830540 | 56.77305817 |
| 341 | 17.92970264 | 23.85969715 | 31.46893017 | 39.85812086 | 48.48608269 | 57.06607019 |
| 342 | 18.22417230 | 24.21916341 | 31.86510378 | 40.27274963 | 48.90731229 | 57.48618070 |
| 343 | 18.52765004 | 24.61242101 | 32.32262048 | 40.77709382 | 49.44631056 | 58.05125791 |
| 344 | 18.83949576 | 25.03447544 | 32.83177343 | 41.35666388 | 50.08390108 | 58.73760861 |
| 345 | 19.15715525 | 25.47401585 | 33.37135792 | 41.97997995 | 50.77839234 | 59.49360728 |
| 346 | 19.47703405 | 25.91645405 | 33.91425234 | 42.60684426 | 51.47655536 | 60.25332513 |
| 347 | 19.79537126 | 26.34696341 | 34.43299935 | 43.19661348 | 52.12460144 | 60.95015924 |
| 348 | 20.10911344 | 26.75351792 | 34.90538684 | 43.71647115 | 52.67915979 | 61.53046158 |
| 349 | 20.41678841 | 27.12993113 | 35.32002907 | 44.14970000 | 53.11825521 | 61.96716812 |
| 350 | 20.71937917 | 27.47889514 | 35.68194766 | 44.50395432 | 53.45228579 | 62.27342793 |
| 351 | 21.01862967 | 27.80799086 | 36.00554949 | 44.80085361 | 53.71011290 | 62.48519477 |
| 352 | 21.31060389 | 28.11026321 | 36.27943001 | 45.02381643 | 53.86967830 | 62.57486934 |
| 353 | 21.59392075 | 28.38325224 | 36.49978357 | 45.16757175 | 53.92421415 | 62.53420167 |
| 354 | 21.87113173 | 28.63305231 | 36.67774083 | 45.24903388 | 53.89671294 | 62.39230931 |
| 355 | 22.14731933 | 28.87138889 | 36.83431310 | 45.29981085 | 53.82988300 | 62.20306449 |
| 356 | 22.42869561 | 29.11269542 | 36.99533663 | 45.35871290 | 53.77610403 | 62.03246133 |
| 357 | 22.72120068 | 29.37119008 | 37.18641699 | 45.46426087 | 53.78738260 | 61.94610304 |
| 358 | 23.02910121 | 29.65795269 | 37.42787335 | 45.64719468 | 53.90530770 | 61.99638913 |
| 359 | 23.35358897 | 29.97800143 | 37.72968283 | 45.92298172 | 54.15100624 | 62.21010260 |
| 360 | 23.69137929 | 30.32736973 | 38.08642482 | 46.28432533 | 54.51509858 | 62.57569714 |
| 361 | 24.04112190 | 30.70068404 | 38.48736268 | 46.71448150 | 54.97460923 | 63.06396743 |
| 362 | 24.41950847 | 31.11569831 | 38.95414626 | 47.24058944 | 55.56299448 | 63.71506848 |
| 363 | 24.82940715 | 31.57609590 | 39.49175337 | 47.86917122 | 56.28843047 | 64.53886218 |
| 364 | 25.25623259 | 32.06614648 | 40.08041204 | 48.57478613 | 57.11896438 | 65.49649652 |
| 365 | 25.67398206 | 32.55735389 | 40.68399625 | 49.31080749 | 57.99599549 | 66.51673435 |
| 366 | 26.05127166 | 33.01510386 | 41.25842158 | 50.02019951 | 58.84775624 | 67.51228207 |
| 367 | 26.35737248 | 33.40531181 | 41.76004092 | 50.64629406 | 59.60279326 | 68.39611837 |
| 368 | 26.58824679 | 33.70107064 | 42.15404011 | 51.14356749 | 60.20344844 | 69.09782291 |
| 369 | 26.67258418 | 33.88929848 | 42.42283367 | 51.48841744 | 60.61933994 | 69.57990507 |
| 370 | 26.67783776 | 33.97738651 | 42.57446044 | 51.68993965 | 60.86084327 | 69.85413268 |
| 371 | 26.60170629 | 33.98559161 | 42.63441729 | 51.78033091 | 60.96756480 | 69.96780252 |
| 372 | 26.43262363 | 33.90629670 | 42.59646182 | 51.75312350 | 60.93182605 | 69.91142453 |
| 373 | 26.17055617 | 33.73998271 | 42.46076276 | 51.60768348 | 60.75190977 | 69.68204416 |
| 374 | 25.83529365 | 33.50367728 | 42.24401578 | 51.36185495 | 60.44769283 | 69.30208829 |
| 375 | 25.46003442 | 33.22570920 | 41.97429681 | 51.04626182 | 60.05400916 | 68.81156401 |
| 376 | 25.08497080 | 32.94046292 | 41.68591553 | 50.69860960 | 59.61401276 | 68.26025741 |
| 377 | 24.75087441 | 32.68313305 | 41.41426871 | 50.35798721 | 59.17254059 | 67.69993236 |
| 378 | 24.49268150 | 32.48447881 | 41.19069362 | 50.05916872 | 58.76947559 | 67.17652928 |
| 379 | 24.33307825 | 32.36557854 | 41.03732148 | 49.82691519 | 58.43310964 | 66.72236393 |
| 380 | 24.27608610 | 32.33258417 | 40.96193079 | 49.67027642 | 58.17350648 | 66.34832617 |
| 381 | 24.30327032 | 32.36886267 | 40.94716062 | 49.56965586 | 57.96796439 | 66.02812622 |
| 382 | 24.39563949 | 32.44546186 | 40.95596738 | 49.48130022 | 57.76707283 | 65.70749944 |

| Wave-length / nm | D50 | D55 | D60 | D65 | D70 | D75 |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| 383 | 24,55516586 | 32,56274311 | 40,98801193 | 49,40474236 | 57,57059529 | 65,38666349 |
| 384 | 24,80091453 | 32,74904609 | 41,07953276 | 49,38304239 | 57,42754665 | 65,11989646 |
| 385 | 25,16268753 | 33,05061115 | 41,29030318 | 49,48732934 | 57,41873048 | 64,99637864 |
| 386 | 25,67466797 | 33,52150174 | 41,69058850 | 49,80134268 | 57,63927616 | 65,12103442 |
| 387 | 26,36906413 | 34,21352685 | 42,34810329 | 50,40597395 | 58,18117610 | 65,59537408 |
| 388 | 27,26975359 | 35,16616338 | 43,31496854 | 51,36380837 | 59,11582295 | 66,49833563 |
| 389 | 28,38592736 | 36,39647862 | 44,61466889 | 52,70366641 | 60,47654677 | 67,86712661 |
| 390 | 29,70573397 | 37,88905259 | 46,22900985 | 54,40514538 | 62,24115225 | 69,67806596 |
| 391 | 31,21507980 | 39,62072948 | 48,12777980 | 56,43241043 | 64,36923353 | 71,88695462 |
| 392 | 32,95460942 | 41,64305248 | 50,37173002 | 58,85411273 | 66,93630010 | 74,57533629 |
| 393 | 34,92708676 | 43,96095865 | 52,96755940 | 61,67840954 | 69,95173693 | 77,75364787 |
| 394 | 37,08488390 | 46,51488695 | 55,84567038 | 64,82712531 | 73,32994501 | 81,32977628 |
| 395 | 39,34681892 | 49,20228834 | 58,88557505 | 68,16446351 | 76,92189654 | 85,14309565 |
| 396 | 41,61499364 | 51,89913573 | 61,94130131 | 71,52571854 | 80,54669004 | 88,99850462 |
| 397 | 43,79163147 | 54,48143405 | 64,86679895 | 74,74598753 | 84,02310555 | 92,70046352 |
| 398 | 45,79591517 | 56,84673028 | 67,54134577 | 77,68888224 | 87,20115979 | 96,08703161 |
| 399 | 47,58082465 | 58,93562344 | 69,89495368 | 80,27524091 | 89,99366123 | 99,06390436 |
| 400 | 49,14997478 | 60,75327466 | 71,93377482 | 82,51184009 | 92,40776536 | 101,63845062 |
| 401 | 50,54019304 | 62,34764052 | 73,71495369 | 84,46355292 | 94,51494374 | 103,88786575 |
| 402 | 51,72121907 | 63,68210744 | 75,19706975 | 86,08523637 | 96,26711185 | 105,76169052 |
| 403 | 52,67749279 | 64,73749883 | 76,35778588 | 87,35176669 | 97,63667234 | 107,23011130 |
| 404 | 53,42884361 | 65,53831673 | 77,22462729 | 88,29260062 | 98,65428040 | 108,32448593 |
| 405 | 54,01909743 | 66,13869016 | 77,85896035 | 88,97426282 | 99,39017948 | 109,11777146 |
| 406 | 54,50468370 | 66,60632347 | 78,33997146 | 89,48283318 | 99,93553700 | 109,70495194 |
| 407 | 54,94324237 | 67,01844468 | 78,74864590 | 89,90643418 | 100,38378003 | 110,18346610 |
| 408 | 55,38223092 | 67,42775388 | 79,15174672 | 90,31771829 | 100,81193107 | 110,63363510 |
| 409 | 55,84753141 | 67,86837154 | 79,58579357 | 90,75635525 | 101,26194366 | 111,09909032 |
| 410 | 56,33205742 | 68,33178686 | 80,04104158 | 91,21151950 | 101,72203817 | 111,56720104 |
| 411 | 56,80920963 | 68,78460468 | 80,47894486 | 91,64066936 | 102,14650974 | 111,98970412 |
| 412 | 57,30334962 | 69,25413774 | 80,92897830 | 92,07489754 | 102,56768421 | 112,39988438 |
| 413 | 57,82603897 | 69,75405303 | 81,40634000 | 92,53053831 | 103,00275406 | 112,81559510 |
| 414 | 58,36139905 | 70,26664161 | 81,89192463 | 92,98739576 | 103,43065418 | 113,21506351 |
| 415 | 58,87552966 | 70,75356481 | 82,34407277 | 93,40126887 | 103,80519918 | 113,55052159 |
| 416 | 59,32592765 | 71,16660037 | 82,71032022 | 93,71647664 | 104,06822066 | 113,76183693 |
| 417 | 59,67090551 | 71,45838864 | 82,93914729 | 93,87838314 | 104,16270452 | 113,79014353 |
| 418 | 59,87901000 | 71,59317870 | 82,99172813 | 93,84592264 | 104,04592816 | 113,59147262 |
| 419 | 59,93844075 | 71,55757459 | 82,85368006 | 93,60412466 | 103,70259785 | 113,15038351 |
| 420 | 59,86646885 | 71,37128141 | 82,54681284 | 93,17663913 | 103,15798595 | 112,49359439 |
| 421 | 59,68744382 | 71,06241052 | 82,10209355 | 92,59665209 | 102,44703803 | 111,65747617 |
| 422 | 59,35753177 | 70,58223235 | 81,46638683 | 91,80705545 | 101,50905757 | 110,57807261 |
| 423 | 58,87233117 | 69,92594934 | 80,63467898 | 90,80273485 | 100,33890413 | 109,25026539 |
| 424 | 58,28315644 | 69,15112155 | 79,67023700 | 89,65216136 | 99,00978926 | 107,75160049 |
| 425 | 57,67810343 | 68,35647174 | 78,68139919 | 88,47237887 | 97,64664427 | 106,21419123 |

| wavelength / nm | D50 | D55 | D60 | D65 | D70 | D75 |
|-----------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 426 | 57.16311495 | 67.66069046 | 77.79836579 | 87.40399150 | 96.39948798 | 104.79662112 |
| 427 | 56.84304628 | 67.18124107 | 77.14998954 | 86.58615091 | 95.41679448 | 103.65584685 |
| 428 | 56.80273071 | 67.01316485 | 76.84056626 | 86.13154376 | 94.81886092 | 102.91910121 |
| 429 | 57.08804502 | 67.20788606 | 76.92662551 | 86.10137906 | 94.67117525 | 102.65579608 |
| 430 | 57.68697501 | 67.75201701 | 77.39372109 | 86.48037554 | 94.95778399 | 102.84942531 |
| 431 | 58.55331772 | 68.59401048 | 78.18561342 | 87.20814107 | 95.61459831 | 103.43258023 |
| 432 | 59.72590065 | 69.77780023 | 79.35060665 | 88.33676952 | 96.69703121 | 104.46361549 |
| 433 | 61.21584639 | 71.31599792 | 80.90271038 | 89.88156999 | 98.22159235 | 105.96015024 |
| 434 | 62.98172619 | 73.16203409 | 82.79113411 | 91.78821815 | 100.13095274 | 107.86225844 |
| 435 | 64.94658746 | 75.22934204 | 84.92129099 | 93.95531997 | 102.31786177 | 110.05757565 |
| 436 | 67.01498118 | 77.41054183 | 87.17580177 | 96.25697547 | 104.64906407 | 112.40640578 |
| 437 | 69.08998941 | 79.59662412 | 89.43549855 | 98.56534249 | 106.98921651 | 114.76682783 |
| 438 | 71.09025278 | 81.69613415 | 91.60042870 | 100.77320044 | 109.22480511 | 117.01980271 |
| 439 | 72.96699789 | 83.65435564 | 93.61085868 | 102.81651405 | 111.28806202 | 119.09427992 |
| 440 | 74.72106484 | 85.47249469 | 95.46827786 | 104.69699713 | 113.18088244 | 120.99230439 |
| 441 | 76.39445843 | 87.19790474 | 97.22460487 | 106.47051800 | 114.96258755 | 122.77625282 |
| 442 | 77.98326040 | 88.82556859 | 98.87418074 | 108.13107239 | 116.62702167 | 124.43994541 |
| 443 | 79.47401949 | 90.34039184 | 100.40053565 | 109.66101969 | 118.15553441 | 125.96384820 |
| 444 | 80.86114689 | 91.73689994 | 101.79798972 | 111.05428766 | 119.54155668 | 127.34084013 |
| 445 | 82.14479984 | 93.01659091 | 103.06866091 | 112.31315891 | 120.78724868 | 128.57277854 |
| 446 | 83.32876523 | 94.18528805 | 104.21947301 | 113.44505744 | 121.90014784 | 129.66706482 |
| 447 | 84.41834327 | 95.25049259 | 105.25916356 | 114.45933510 | 122.88981679 | 130.63320990 |
| 448 | 85.41823104 | 96.21873644 | 106.19529179 | 115.36405811 | 123.76449134 | 131.47939988 |
| 449 | 86.33040620 | 97.09293488 | 107.03124659 | 116.16279354 | 124.52772842 | 132.20906157 |
| 450 | 87.15201050 | 97.86973922 | 107.76325439 | 116.85139583 | 125.17505406 | 132.81742806 |
| 451 | 87.87327689 | 98.53760677 | 108.37850065 | 117.41612271 | 125.69203876 | 133.28955207 |
| 452 | 88.48346901 | 99.08526722 | 108.86517235 | 117.84463005 | 126.06582990 | 133.61209875 |
| 453 | 88.98213375 | 99.51244943 | 109.22305220 | 118.13667521 | 126.29611117 | 133.78464894 |
| 454 | 89.37814033 | 99.82842445 | 109.46175542 | 118.30217202 | 126.39305802 | 133.81761011 |
| 455 | 89.68674021 | 100.04900780 | 109.59765219 | 118.35802244 | 126.37407451 | 133.72885773 |
| 456 | 89.92662696 | 100.19356170 | 109.65079007 | 118.32494824 | 126.26053002 | 133.54037685 |
| 457 | 90.11699614 | 100.28199730 | 109.64181646 | 118.22432270 | 126.07449612 | 133.27490345 |
| 458 | 90.27460516 | 100.33177700 | 109.58890104 | 118.07500228 | 125.83548332 | 132.95256600 |
| 459 | 90.41083321 | 100.35491660 | 109.50465816 | 117.89015831 | 125.55717784 | 132.58752685 |
| 460 | 90.52874111 | 100.35498760 | 109.39306933 | 117.67410863 | 125.24417846 | 132.18462375 |
| 461 | 90.62061268 | 100.32415640 | 109.24610917 | 117.41859705 | 124.88798063 | 131.73509843 |
| 462 | 90.67686472 | 100.25155900 | 109.05182004 | 117.11071944 | 124.47485262 | 131.22448662 |
| 463 | 90.69955194 | 100.13936360 | 108.81249143 | 116.75288757 | 124.00732552 | 130.65543408 |
| 464 | 90.70087004 | 100.00141890 | 108.54340089 | 116.36162796 | 123.50302681 | 130.04654926 |
| 465 | 90.69950319 | 99.85906437 | 108.26816984 | 115.96254724 | 122.98930651 | 129.42673064 |
| 466 | 90.71697151 | 99.73694072 | 108.01411939 | 115.58529758 | 122.49786323 | 128.82949411 |
| 467 | 90.77397863 | 99.65880009 | 107.80762610 | 115.25854206 | 122.05937033 | 128.28730032 |
| 468 | 90.86675910 | 99.64331638 | 107.66947783 | 115.00492006 | 121.69810202 | 127.82588198 |

| Wave-length / nm | D50 | D55 | D60 | D65 | D70 | D75 |
|------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 469 | 91,06342594 | 99,69989561 | 107,61022951 | 114,83601266 | 121,42655946 | 127,45857130 |
| 470 | 91,30031812 | 99,82448619 | 107,62555896 | 114,74730803 | 121,24009688 | 127,18062723 |
| 471 | 91,59291661 | 100,01160970 | 107,70916584 | 114,73179270 | 121,13107592 | 126,98385735 |
| 472 | 91,96876447 | 100,29135460 | 107,89309561 | 114,82305221 | 121,13431884 | 126,90409829 |
| 473 | 92,43367539 | 100,67015330 | 108,18429805 | 115,02847660 | 121,25759523 | 126,94945161 |
| 474 | 92,96450083 | 101,12267380 | 108,55580786 | 115,31985040 | 121,47171357 | 127,08994737 |
| 475 | 93,51892117 | 101,60254810 | 108,95818814 | 115,64535604 | 121,72297160 | 127,27035901 |
| 476 | 94,04523684 | 102,05309910 | 109,33097384 | 115,94157722 | 121,94560674 | 127,42301827 |
| 477 | 94,49215947 | 102,41806910 | 109,61411525 | 116,14550232 | 122,07424641 | 127,48063009 |
| 478 | 94,81860302 | 102,65234690 | 109,75942145 | 116,20652777 | 122,05635847 | 127,38908749 |
| 479 | 95,00347491 | 102,73269620 | 109,74200381 | 116,09846146 | 121,86470157 | 127,12028652 |
| 480 | 95,05546718 | 102,66848270 | 109,57171941 | 115,83152613 | 121,50977551 | 126,68494112 |
| 481 | 94,99785675 | 102,48539620 | 109,27613194 | 115,43477535 | 121,02184221 | 126,11431370 |
| 482 | 94,80225299 | 102,15344730 | 108,82421363 | 114,87651411 | 120,36878894 | 125,37604288 |
| 483 | 94,46176066 | 101,66523330 | 108,20818954 | 114,14868853 | 119,54234890 | 124,46169596 |
| 484 | 94,00496017 | 101,05111150 | 107,45959799 | 113,28362101 | 118,57535957 | 123,40444184 |
| 485 | 93,48408392 | 100,36662920 | 106,63621581 | 112,34059204 | 117,52811124 | 122,26524193 |
| 486 | 92,96319265 | 99,67995413 | 105,80898362 | 111,39242200 | 116,47469550 | 121,11904109 |
| 487 | 92,50635177 | 99,05930480 | 105,04893113 | 110,51205301 | 115,48935379 | 120,04095855 |
| 488 | 92,16580777 | 98,56038057 | 104,41410242 | 109,75913069 | 114,63282581 | 119,09247879 |
| 489 | 91,97016449 | 98,21379201 | 103,93648120 | 109,16658598 | 113,93869806 | 118,30764254 |
| 490 | 91,91255954 | 98,01249120 | 103,60891610 | 108,72721700 | 113,39975250 | 117,67923762 |
| 491 | 91,96384779 | 97,92535017 | 103,39888430 | 108,40750497 | 112,98175065 | 117,17249923 |
| 492 | 92,14451814 | 97,97293249 | 103,32674336 | 108,22743808 | 112,70422087 | 116,80644868 |
| 493 | 92,46246560 | 98,16354541 | 103,40103497 | 108,19567760 | 112,57586934 | 116,58978835 |
| 494 | 92,89809797 | 98,47757480 | 103,60232914 | 108,29309663 | 112,57793711 | 116,50416017 |
| 495 | 93,41330984 | 98,87657734 | 103,89231197 | 108,48178944 | 112,67308753 | 116,51288600 |
| 496 | 93,96045657 | 99,31237271 | 104,22287352 | 108,71408089 | 112,81429353 | 116,56970794 |
| 497 | 94,49132829 | 99,73613572 | 104,54519548 | 108,94153578 | 112,95372504 | 116,62752874 |
| 498 | 94,96612385 | 100,10748860 | 104,81883909 | 109,12396824 | 113,05163635 | 116,64715209 |
| 499 | 95,36242485 | 100,40359290 | 105,02083280 | 109,23845109 | 113,08525342 | 116,60602302 |
| 500 | 95,68416961 | 100,62824210 | 105,15476016 | 109,28832527 | 113,05766132 | 116,50696819 |
| 501 | 95,95585195 | 100,80650730 | 105,24592528 | 109,29891258 | 112,99406551 | 116,37499389 |
| 502 | 96,17451418 | 100,93691660 | 105,29436420 | 109,27172335 | 112,89738681 | 116,21435793 |
| 503 | 96,33573724 | 101,01514340 | 105,29590974 | 109,20278556 | 112,76386481 | 116,02151705 |
| 504 | 96,44332725 | 101,04361880 | 105,25160077 | 109,09177851 | 112,59187913 | 115,79361968 |
| 505 | 96,50681706 | 101,02953740 | 105,16621906 | 108,94110083 | 112,38153321 | 115,52858349 |
| 506 | 96,53896782 | 100,98286300 | 105,04682618 | 108,75493854 | 112,13423795 | 115,22517280 |
| 507 | 96,55327056 | 100,91433390 | 104,90130028 | 108,53833309 | 111,85229546 | 114,88307614 |
| 508 | 96,56144773 | 100,83346900 | 104,73687302 | 108,29624941 | 111,53848274 | 114,50298371 |
| 509 | 96,57095480 | 100,74657300 | 104,55866639 | 108,03264397 | 111,19563543 | 114,08666488 |
| 510 | 96,58248178 | 100,65474240 | 104,36822957 | 107,74953279 | 110,82623149 | 113,63704568 |
| 511 | 96,58653248 | 100,54957940 | 104,15837684 | 107,44097313 | 110,42555416 | 113,15059599 |

| Wave-length / nm | D50 | D55 | D60 | D65 | D70 | D75 |
|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 512 | 96,56891342 | 100,41514150 | 103,91146132 | 107,08769351 | 109,97280419 | 112,60508613 |
| 513 | 96,52893560 | 100,25032620 | 103,62599039 | 106,68783797 | 109,46578937 | 111,99801271 |
| 514 | 96,47865465 | 100,06886170 | 103,31739563 | 106,25850667 | 108,92320835 | 111,34959098 |
| 515 | 96,43840132 | 99,89414525 | 103,01217559 | 105,82922476 | 108,37747812 | 110,69497665 |
| 516 | 96,43231210 | 99,75407979 | 102,74203857 | 105,43541127 | 107,86756160 | 110,07648767 |
| 517 | 96,48385978 | 99,67591168 | 102,53804541 | 105,11184810 | 107,43179515 | 109,53582605 |
| 518 | 96,61138400 | 99,68106795 | 102,42475233 | 104,88614884 | 107,10071613 | 109,10629961 |
| 519 | 96,82362186 | 99,77999371 | 102,41435366 | 104,77222779 | 106,88989038 | 108,80504383 |
| 520 | 97,11523845 | 99,96698950 | 102,50082467 | 104,76376880 | 106,79273984 | 108,62524360 |
| 521 | 97,47717512 | 100,23128090 | 102,67166131 | 104,84658349 | 106,79346908 | 108,54958304 |
| 522 | 97,93222561 | 100,59673000 | 102,95165357 | 105,04627570 | 106,91840132 | 108,60502785 |
| 523 | 98,48441445 | 101,06782690 | 103,34574751 | 105,36822801 | 107,17333082 | 108,79775845 |
| 524 | 99,11130378 | 101,62114230 | 103,82966395 | 105,78742288 | 107,53259242 | 109,10153510 |
| 525 | 99,77288795 | 102,21469610 | 104,35968650 | 106,25860569 | 107,94956097 | 109,46850094 |
| 526 | 100,42048806 | 102,79732480 | 104,88244945 | 106,72644794 | 108,36715075 | 109,83998508 |
| 527 | 101,00564653 | 103,31804900 | 105,34472585 | 107,13571037 | 108,72831486 | 110,15730563 |
| 528 | 101,48902169 | 103,73544150 | 105,70321539 | 107,44140608 | 108,98654470 | 110,37257278 |
| 529 | 101,84928229 | 104,02699520 | 105,93433245 | 107,61896369 | 109,11636926 | 110,45949186 |
| 530 | 102,09200213 | 104,19849020 | 106,04399403 | 107,67439047 | 109,12385465 | 110,42416637 |
| 531 | 102,23754107 | 104,27153140 | 106,05493594 | 107,63144917 | 109,03369609 | 110,29214205 |
| 532 | 102,26350100 | 104,22341320 | 105,94440927 | 107,46750887 | 108,82347720 | 110,04127366 |
| 533 | 102,16265800 | 104,04661470 | 105,70463589 | 107,17456593 | 108,48499512 | 109,66318057 |
| 534 | 101,95501273 | 103,76137610 | 105,35581840 | 106,77261914 | 108,03794768 | 109,17720462 |
| 535 | 101,67878180 | 103,40651870 | 104,93689571 | 106,30042671 | 107,52073272 | 108,62127696 |
| 536 | 101,38138901 | 103,03026520 | 104,49629857 | 105,80626318 | 106,98124736 | 108,04278490 |
| 537 | 101,11045664 | 102,68106060 | 104,08270515 | 105,33867632 | 106,46768736 | 107,48943877 |
| 538 | 100,90479678 | 102,39839210 | 103,73579659 | 104,93724409 | 106,01934622 | 107,00013869 |
| 539 | 100,78540258 | 102,20360960 | 103,47701257 | 104,62333155 | 105,65741471 | 106,59584145 |
| 540 | 100,74643956 | 102,09074620 | 103,30030687 | 104,39084779 | 105,37577998 | 106,27042736 |
| 541 | 100,76514766 | 102,03653710 | 103,18215292 | 104,21615966 | 105,15080163 | 106,00031226 |
| 542 | 100,85641295 | 102,05591560 | 103,13730021 | 104,11369862 | 104,99851915 | 105,79910567 |
| 543 | 101,02607597 | 102,15479410 | 103,17164663 | 104,08929642 | 104,91866806 | 105,67242983 |
| 544 | 101,25963906 | 102,31858420 | 103,27071026 | 104,12869336 | 104,90327621 | 105,60663521 |
| 545 | 101,52895743 | 102,51894230 | 103,40633583 | 104,20415110 | 104,92315169 | 105,57514628 |
| 546 | 101,79893022 | 102,72051450 | 103,54340137 | 104,28106564 | 104,94437072 | 105,54480724 |
| 547 | 102,03419152 | 102,88768220 | 103,64652477 | 104,32458018 | 104,93276551 | 105,48222784 |
| 548 | 102,20580144 | 102,99130690 | 103,68677028 | 104,30619805 | 104,86041221 | 105,36012905 |
| 549 | 102,29793712 | 103,01547590 | 103,64835516 | 104,21039560 | 104,71211872 | 105,16368892 |
| 550 | 102,31458385 | 102,96424710 | 103,53535620 | 104,04123512 | 104,49191264 | 104,89688825 |
| 551 | 102,27427828 | 102,85626000 | 103,36628003 | 103,81695221 | 104,21768068 | 104,57722327 |
| 552 | 102,17285751 | 102,68704150 | 103,13647433 | 103,53279996 | 103,88463664 | 104,19990472 |
| 553 | 102,00754181 | 102,45373960 | 102,84307852 | 103,18594812 | 103,49000380 | 103,76222294 |
| 554 | 101,78451508 | 102,16279970 | 102,49268367 | 102,78305862 | 103,04046654 | 103,27085338 |

| wavelength / nm | D50 | D55 | D60 | D65 | D70 | D75 |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 555 | 101.51610689 | 101.82703170 | 102.09834308 | 102.33727759 | 102.54916769 | 102.73887427 |
| 556 | 101.21797436 | 101.46267600 | 101.67658277 | 101.86522736 | 102.03270583 | 102.18278434 |
| 557 | 100.90628422 | 101.08647080 | 101.24441204 | 101.38399846 | 101.50813258 | 101.61952053 |
| 558 | 100.59489470 | 100.71271830 | 100.81633394 | 100.90814162 | 100.98994993 | 101.06347567 |
| 559 | 100.29253756 | 100.35035130 | 100.40135585 | 100.44665977 | 100.48710753 | 100.52351623 |
| 560 | 100.00000000 | 100.00000000 | 100.00000000 | 100.00000000 | 100.00000000 | 100.00000000 |
| 561 | 99.70802852 | 99.65206053 | 99.60254605 | 99.55847094 | 99.51905411 | 99.48352611 |
| 562 | 99.40627618 | 99.29639964 | 99.19925211 | 99.11281731 | 99.03554609 | 98.96591859 |
| 563 | 99.09493153 | 98.93319519 | 98.79033559 | 98.66332520 | 98.54984680 | 98.44764136 |
| 564 | 98.78318368 | 98.57124208 | 98.38416552 | 98.21793187 | 98.06947061 | 97.93580143 |
| 565 | 98.48598851 | 98.22484287 | 97.99431036 | 97.78944551 | 97.60647145 | 97.44171980 |
| 566 | 98.22083492 | 97.91069845 | 97.63658571 | 97.39276509 | 97.17483894 | 96.97850250 |
| 567 | 98.00451099 | 97.64479861 | 97.32610209 | 97.04210010 | 96.78789437 | 96.55861144 |
| 568 | 97.84987021 | 97.43931270 | 97.07431269 | 96.74819043 | 96.45568688 | 96.19143547 |
| 569 | 97.76259770 | 97.29948024 | 96.88606114 | 96.51552611 | 96.18238949 | 95.88086126 |
| 570 | 97.73797642 | 97.22050159 | 96.75662924 | 96.33956715 | 95.96369515 | 95.62284430 |
| 571 | 97.77180498 | 97.19839003 | 96.68228699 | 96.21685771 | 95.79642505 | 95.41447816 |
| 572 | 97.89150398 | 97.26043554 | 96.68960203 | 96.17290755 | 95.70485387 | 95.27871803 |
| 573 | 98.10216089 | 97.41153566 | 96.73323872 | 96.21212888 | 95.69313730 | 95.21946624 |
| 574 | 98.37964438 | 97.62743845 | 96.93944777 | 96.31163659 | 95.73945327 | 95.21606605 |
| 575 | 98.68055835 | 97.86467693 | 97.11575130 | 96.43055241 | 95.80485507 | 95.23166920 |
| 576 | 98.95219592 | 98.07050360 | 97.26062787 | 96.51930929 | 95.84212443 | 95.22160355 |
| 577 | 99.14249345 | 98.19282490 | 97.32319752 | 96.52895549 | 95.80462468 | 95.14174058 |
| 578 | 99.20998458 | 98.19013572 | 97.26290678 | 96.42045887 | 95.65515379 | 94.95686298 |
| 579 | 99.13375422 | 98.04145385 | 97.05921373 | 96.17401113 | 95.37479752 | 94.64903220 |
| 580 | 98.92339257 | 97.75625446 | 96.72127304 | 95.79833203 | 94.97178250 | 94.22595605 |
| 581 | 98.60189642 | 97.35753073 | 96.27152603 | 95.31499646 | 94.46664747 | 93.70705280 |
| 582 | 98.13573989 | 96.81219851 | 95.67801569 | 94.69355430 | 93.83064062 | 93.06535175 |
| 583 | 97.51756951 | 96.11299388 | 94.93370189 | 93.92726345 | 93.05735522 | 92.29479758 |
| 584 | 96.78105015 | 95.29324158 | 94.07081887 | 93.04684750 | 92.17578784 | 91.42256182 |
| 585 | 95.98715635 | 94.41330221 | 93.14776955 | 92.10799953 | 91.23853440 | 90.49796795 |
| 586 | 95.21046362 | 93.54701945 | 92.23601992 | 91.17888582 | 90.30998618 | 89.58141654 |
| 587 | 94.52543981 | 92.76816726 | 91.40699329 | 90.32764961 | 89.45452585 | 88.73331031 |
| 588 | 93.99273638 | 92.13689711 | 90.71896463 | 89.60991486 | 88.72472350 | 88.00297928 |
| 589 | 93.64547980 | 91.68618517 | 90.20395490 | 89.05628997 | 88.14953266 | 87.41760587 |
| 590 | 93.47556279 | 91.40827953 | 89.85462537 | 88.65987155 | 87.72248632 | 86.97114997 |
| 591 | 93.44890878 | 91.26953948 | 89.63844768 | 88.38961833 | 87.41421923 | 86.63600404 |
| 592 | 93.58882149 | 91.29244398 | 89.57672577 | 88.26548381 | 87.24326510 | 86.42927068 |
| 593 | 93.90394187 | 91.48563826 | 89.67785790 | 88.29547491 | 87.21716143 | 86.35797906 |
| 594 | 94.37098847 | 91.82696720 | 89.92099879 | 88.46012662 | 87.31782687 | 86.40540148 |
| 595 | 94.94514064 | 92.27348249 | 90.26555242 | 88.72141262 | 87.50986458 | 86.53874773 |
| 596 | 95.57042174 | 92.77144982 | 90.66066477 | 89.03165581 | 87.74886563 | 86.71685934 |
| 597 | 96.19008234 | 93.26635603 | 91.05471657 | 89.34243894 | 87.98971236 | 86.89790391 |

| Wave-length / nm | D50 | D55 | D60 | D65 | D70 | D75 |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 598 | 96.75698348 | 93.71291630 | 91.40481608 | 89.61351514 | 88.19488174 | 87.04706939 |
| 599 | 97.24397980 | 94.08508135 | 91.68629183 | 89.82171856 | 88.34274878 | 87.14425838 |
| 600 | 97.65430284 | 94.38604454 | 91.90218539 | 89.96987487 | 88.43588988 | 87.19178244 |
| 601 | 98.01397934 | 94.64105838 | 92.07654763 | 90.08061206 | 88.49541444 | 87.20920662 |
| 602 | 98.31492565 | 94.84278283 | 92.20276941 | 90.14802148 | 88.51607506 | 87.19190433 |
| 603 | 98.54941091 | 94.98387672 | 92.27393903 | 90.16563166 | 88.49183430 | 87.13425815 |
| 604 | 98.72159909 | 95.06807434 | 92.29330691 | 90.13619143 | 88.42494303 | 87.03803484 |
| 605 | 98.84376651 | 95.10666652 | 92.27106104 | 90.06874907 | 88.32332025 | 86.91005703 |
| 606 | 98.93251937 | 95.11498180 | 92.22110236 | 89.97573149 | 88.19793304 | 86.75987493 |
| 607 | 99.00501121 | 95.10886755 | 92.15782021 | 89.87002334 | 88.06017638 | 86.59743801 |
| 608 | 99.07516047 | 95.10117108 | 92.09286775 | 89.76204625 | 87.91925305 | 86.43076668 |
| 609 | 99.14986794 | 95.09822079 | 92.03193740 | 89.65683789 | 87.77955353 | 86.26362396 |
| 610 | 99.22523434 | 95.09630729 | 91.97153625 | 89.55113122 | 87.63803580 | 86.09318720 |
| 611 | 99.29112418 | 95.08581872 | 91.90274782 | 89.43678748 | 87.48736721 | 85.91292920 |
| 612 | 99.35471445 | 95.07297530 | 91.83110550 | 89.31883780 | 87.33220574 | 85.72722588 |
| 613 | 99.41883754 | 95.06023994 | 91.75878150 | 89.19922040 | 87.17429755 | 85.53766257 |
| 614 | 99.47708346 | 95.04180438 | 91.68046120 | 89.07303357 | 87.00909183 | 85.33999158 |
| 615 | 99.51702606 | 95.00647709 | 91.58596106 | 88.93093344 | 86.82795541 | 85.12619170 |
| 616 | 99.52344911 | 94.94057126 | 91.46284667 | 88.76153155 | 86.62038735 | 84.88652771 |
| 617 | 99.48157248 | 94.83079272 | 91.29905069 | 88.55379262 | 86.37623353 | 84.61160989 |
| 618 | 99.38027830 | 94.66712786 | 91.08549083 | 88.29943216 | 86.08790122 | 84.29445350 |
| 619 | 99.21533709 | 94.44573161 | 90.81868786 | 87.99531420 | 85.75257368 | 83.93253831 |
| 620 | 98.99263392 | 94.17181534 | 90.50338355 | 87.64584891 | 85.37442476 | 83.52986810 |
| 621 | 98.71889309 | 93.85145416 | 90.14511598 | 87.25612194 | 84.95815323 | 83.09080567 |
| 622 | 98.37317406 | 93.46624332 | 89.72724859 | 86.81074561 | 84.48926201 | 82.60149508 |
| 623 | 97.95253249 | 93.01361587 | 89.24750770 | 86.30767963 | 83.96590018 | 82.06024232 |
| 624 | 97.47826787 | 92.51239289 | 88.72301321 | 85.76286557 | 83.40318957 | 81.48159742 |
| 625 | 96.98765117 | 91.99549146 | 88.18367036 | 85.20410218 | 82.82744514 | 80.89082348 |
| 626 | 96.52565256 | 91.50263254 | 87.66556161 | 84.66492063 | 82.27039531 | 80.31836578 |
| 627 | 96.13666905 | 91.07304889 | 87.20433845 | 84.17845986 | 81.76340228 | 79.79432080 |
| 628 | 95.85625222 | 90.73819301 | 86.82861327 | 83.77134178 | 81.33168241 | 79.34290526 |
| 629 | 95.70283588 | 90.51444506 | 86.55335115 | 83.45754666 | 80.98852655 | 78.97692520 |
| 630 | 95.66946375 | 90.39582074 | 86.37326175 | 83.23228832 | 80.72952037 | 78.69224506 |
| 631 | 95.73835903 | 90.36663281 | 86.27410705 | 83.08234574 | 80.54216215 | 78.47687567 |
| 632 | 95.93960190 | 90.45293126 | 86.27905724 | 83.02879446 | 80.44598072 | 78.34918484 |
| 633 | 96.28058877 | 90.66123923 | 86.39401171 | 83.07708047 | 80.44608751 | 78.31403301 |
| 634 | 96.73355630 | 90.96762513 | 86.59776007 | 83.20795833 | 80.52467581 | 78.35468298 |
| 635 | 97.24734280 | 91.32788413 | 86.85103827 | 83.38573194 | 80.64866225 | 78.43999368 |
| 636 | 97.75914981 | 91.68771963 | 87.10558477 | 83.56649536 | 80.77732819 | 78.53161402 |
| 637 | 98.20630357 | 91.99292472 | 87.31319667 | 83.70637358 | 80.86996114 | 78.59117668 |
| 638 | 98.53801651 | 92.19956364 | 87.43478584 | 83.76976338 | 80.89349617 | 78.58749193 |
| 639 | 98.72714878 | 92.28415324 | 87.44943508 | 83.73757404 | 80.83015736 | 78.50374145 |
| 640 | 98.78196972 | 92.25384446 | 87.36345425 | 83.61546821 | 80.68509921 | 78.34467216 |

| Wavelength / nm | D50 | D55 | D60 | D65 | D70 | D75 |
|-----------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 641 | 98.73194835 | 92.13424435 | 87.19968322 | 83.42426667 | 80.47764613 | 78.12848049 |
| 642 | 98.55450142 | 91.90619661 | 86.94114708 | 83.14918805 | 80.19443807 | 77.84290851 |
| 643 | 98.24242696 | 91.56353659 | 86.56336490 | 82.78527418 | 79.83086094 | 77.48358245 |
| 644 | 97.81914064 | 91.12623359 | 86.14275027 | 82.34792680 | 79.40076420 | 77.06311055 |
| 645 | 97.32862550 | 90.63181659 | 85.65236033 | 81.86623582 | 78.93041478 | 76.60552608 |
| 646 | 96.82538176 | 90.12679994 | 85.15278894 | 81.37630760 | 78.45245097 | 76.14073043 |
| 647 | 96.36437659 | 89.65810915 | 84.68500219 | 80.91459331 | 77.99983624 | 75.69893613 |
| 648 | 95.99099391 | 89.26450657 | 84.28285016 | 80.51121716 | 77.59981318 | 75.30510990 |
| 649 | 95.73098419 | 88.96801712 | 83.96557873 | 80.18330471 | 77.26785730 | 74.97341576 |
| 650 | 95.58041416 | 88.76535406 | 83.73034135 | 79.92831120 | 77.00163100 | 74.70165800 |
| 651 | 95.51135314 | 88.63259640 | 83.55616656 | 79.72748177 | 76.78407701 | 74.47410623 |
| 652 | 95.52436926 | 88.56970425 | 83.44265091 | 79.58020871 | 76.61448799 | 74.29002262 |
| 653 | 95.62351765 | 88.58005724 | 83.39268286 | 79.48901593 | 76.49511252 | 74.15144371 |
| 654 | 95.80580397 | 88.66153234 | 83.40469576 | 79.45268546 | 76.42494232 | 74.05747737 |
| 655 | 96.06315102 | 88.80800341 | 83.47385704 | 79.46724041 | 76.40005973 | 74.00506296 |
| 656 | 96.38436523 | 89.01064091 | 83.59325740 | 79.52692794 | 76.41698513 | 73.98973146 |
| 657 | 96.75710330 | 89.26041146 | 83.75509994 | 79.62520224 | 76.46852435 | 74.00636563 |
| 658 | 97.16983868 | 89.54757754 | 83.95188934 | 79.75570748 | 76.54961617 | 74.04996022 |
| 659 | 97.61382819 | 89.86519710 | 84.17762101 | 79.91326080 | 76.65567969 | 74.11638207 |
| 660 | 98.08507852 | 90.20962317 | 84.42897028 | 80.09483526 | 76.78396180 | 74.20313029 |
| 661 | 98.58833122 | 90.58458016 | 84.70895497 | 80.30295185 | 76.93663121 | 74.31212175 |
| 662 | 99.13476360 | 91.00072060 | 85.02750486 | 80.54672030 | 77.12194120 | 74.45074990 |
| 663 | 99.72113373 | 91.45549134 | 85.38252197 | 80.82434230 | 77.33828798 | 74.61753390 |
| 664 | 100.32988153 | 91.93288856 | 85.75945970 | 81.12262345 | 77.57372476 | 74.80167879 |
| 665 | 100.93397224 | 92.40801016 | 86.13553679 | 81.42083031 | 77.80946096 | 74.98622474 |
| 666 | 101.50173986 | 92.85160826 | 86.48395110 | 81.69454745 | 78.02336157 | 75.15119634 |
| 667 | 102.00173061 | 93.23464156 | 86.77809353 | 81.91953445 | 78.19344637 | 75.27675188 |
| 668 | 102.40754641 | 93.53282782 | 86.99576184 | 82.07558293 | 78.30138926 | 75.34633255 |
| 669 | 102.70268835 | 93.73119627 | 87.12337455 | 82.15037360 | 78.33601752 | 75.34981181 |
| 670 | 102.88540012 | 93.82864004 | 87.16018478 | 82.14333329 | 78.29681113 | 75.28664456 |
| 671 | 102.96956502 | 93.83793908 | 87.11789889 | 82.06514608 | 78.19349352 | 75.16565528 |
| 672 | 102.96509581 | 93.76604534 | 87.00179826 | 81.92025512 | 78.03021011 | 74.99104355 |
| 673 | 102.87161535 | 93.61228633 | 86.81110987 | 81.70790784 | 77.80630316 | 74.76229174 |
| 674 | 102.68213534 | 93.37213833 | 86.54265372 | 81.42554821 | 77.51937623 | 74.47686285 |
| 675 | 102.38583925 | 93.03900076 | 86.19207236 | 81.06979890 | 77.16622040 | 74.13119441 |
| 676 | 101.97086520 | 92.60597065 | 85.75506052 | 80.63744329 | 76.74374046 | 73.72169234 |
| 677 | 101.42708876 | 92.06761697 | 85.22859460 | 80.12640764 | 76.24988112 | 73.24572489 |
| 678 | 100.74890590 | 91.42175511 | 84.61216227 | 79.53674313 | 75.68455321 | 72.70261652 |
| 679 | 99.93801584 | 90.67122123 | 83.90899204 | 78.87160797 | 75.05055987 | 72.09464180 |
| 680 | 99.00620389 | 89.82564670 | 83.12728281 | 78.13824950 | 74.35452279 | 71.42801928 |
| 681 | 97.95832101 | 88.88801346 | 82.26909896 | 77.33841852 | 73.59826284 | 70.70488318 |
| 682 | 96.75358857 | 87.82592711 | 81.30766668 | 76.44911568 | 72.76130039 | 69.90641417 |
| 683 | 95.39054616 | 86.63887425 | 80.24301407 | 75.47064852 | 71.84405178 | 69.03302598 |

| length / nm | D50 | D55 | D60 | D65 | D70 | D75 |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 684 | 93.91590993 | 85.36486760 | 79.10726379 | 74.43113418 | 70.87191394 | 68.10827884 |
| 685 | 92.40818593 | 84.06733912 | 77.95371624 | 73.37704571 | 69.88678026 | 67.17102761 |
| 686 | 90.96128357 | 82.82203316 | 76.84593284 | 72.36375838 | 68.93855659 | 66.26756980 |
| 687 | 89.66812900 | 81.70389951 | 75.84681928 | 71.44609598 | 68.07667709 | 65.44379360 |
| 688 | 88.60427855 | 80.77398661 | 75.00770876 | 70.66887712 | 67.34162019 | 64.73732599 |
| 689 | 87.81153212 | 80.06633460 | 74.35744525 | 70.05746159 | 66.75642452 | 64.16968073 |
| 690 | 87.28154661 | 79.57486847 | 73.89146672 | 69.60829660 | 66.31820483 | 63.73840643 |
| 691 | 86.97344153 | 79.26640124 | 73.58171307 | 69.29673726 | 66.00457056 | 63.42257355 |
| 692 | 86.91242859 | 79.15783604 | 73.43948509 | 69.13029292 | 65.82047294 | 63.22542188 |
| 693 | 87.10693115 | 79.25532266 | 73.46942747 | 69.11261468 | 65.76891565 | 63.14954361 |
| 694 | 87.52819938 | 79.53836763 | 73.65664877 | 69.23263372 | 65.84143773 | 63.18824971 |
| 695 | 88.12206476 | 79.96812965 | 73.97268467 | 69.46894621 | 66.02143368 | 63.32817767 |
| 696 | 88.82069457 | 80.49571512 | 74.38146118 | 69.79419815 | 66.28747348 | 63.55169912 |
| 697 | 89.55434647 | 81.07047365 | 74.84525784 | 70.17947035 | 66.61662265 | 63.84052756 |
| 698 | 90.26312294 | 81.64829358 | 75.33067102 | 70.59866324 | 66.98776230 | 64.17632602 |
| 699 | 90.90872586 | 82.19989746 | 75.81457708 | 71.03288185 | 67.38490916 | 64.54531471 |
| 700 | 91.48621097 | 82.71913758 | 76.29009565 | 71.47482067 | 67.80053564 | 64.93987873 |
| 701 | 92.03249897 | 83.23371411 | 76.77868256 | 71.94168410 | 68.24895433 | 65.37237388 |
| 702 | 92.58867804 | 83.78594956 | 77.32317322 | 72.47637174 | 68.77284894 | 65.88509420 |
| 703 | 93.15270205 | 84.37558559 | 77.92449592 | 73.08059437 | 69.37443937 | 66.48058238 |
| 704 | 93.68586311 | 84.96255227 | 78.54197467 | 73.71354733 | 70.01309197 | 67.11856316 |
| 705 | 94.12604981 | 85.48115162 | 79.10802586 | 74.30684882 | 70.62032427 | 67.73090090 |
| 706 | 94.40099339 | 85.85424113 | 79.54285479 | 74.77947817 | 71.11480959 | 68.23655727 |
| 707 | 94.44151600 | 86.00741733 | 79.76915230 | 75.05271411 | 71.41738176 | 68.55654883 |
| 708 | 94.19477889 | 85.88319929 | 79.72679134 | 75.06507305 | 71.46603970 | 68.62890468 |
| 709 | 93.63753058 | 85.45521216 | 79.38752356 | 74.78724735 | 71.23095219 | 68.42362410 |
| 710 | 92.78935515 | 84.74237073 | 78.76967588 | 74.23704357 | 70.72946247 | 67.95763415 |
| 711 | 91.67610304 | 83.77356853 | 77.90393534 | 73.44613072 | 69.99368971 | 67.26315428 |
| 712 | 90.21521635 | 82.47091327 | 76.71607250 | 72.34322194 | 68.95475728 | 66.27332227 |
| 713 | 88.39555821 | 80.82285505 | 75.19434542 | 70.91652293 | 67.60090659 | 64.97647068 |
| 714 | 86.30248399 | 78.90955075 | 73.41486892 | 69.23893138 | 66.00242353 | 63.44072063 |
| 715 | 84.08543004 | 76.87210288 | 71.51217453 | 67.43967805 | 64.28418022 | 61.78728819 |
| 716 | 81.92550227 | 74.88179857 | 69.64977063 | 65.67596788 | 62.59817679 | 60.16379077 |
| 717 | 80.00306487 | 73.10934845 | 67.99070242 | 64.10462109 | 61.09608311 | 58.71755349 |
| 718 | 78.46532894 | 71.69412557 | 66.66811201 | 62.85371427 | 59.90178059 | 57.56891553 |
| 719 | 77.39394119 | 70.71340435 | 65.75579845 | 61.99422149 | 59.08390394 | 56.78453660 |
| 720 | 76.77257255 | 70.15159945 | 65.23877778 | 61.51165537 | 58.62838296 | 56.35070319 |
| 721 | 76.51971340 | 69.93103264 | 65.04247970 | 61.33401956 | 58.46538903 | 56.19944489 |
| 722 | 76.68058397 | 70.09351096 | 65.20613829 | 61.49856319 | 58.63060886 | 56.36519189 |
| 723 | 77.27344380 | 70.65627286 | 65.74618146 | 62.02105620 | 59.13926817 | 56.86271099 |
| 724 | 78.25005184 | 71.57459941 | 66.62054372 | 62.86147876 | 59.95295626 | 57.65488463 |
| 725 | 79.51683669 | 72.76153883 | 67.74728841 | 63.94178310 | 60.99670261 | 58.66922995 |
| 726 | 80.95606877 | 74.10763105 | 69.02322992 | 65.16365542 | 62.17605347 | 59.81441781 |

| Wave-length / nm | D50 | D55 | D60 | D65 | D70 | D75 |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 727 | 82.44702055 | 75.50063217 | 70.34255596 | 66.42627784 | 63.39414856 | 60.99679190 |
| 728 | 83.88715672 | 76.84523902 | 71.61544978 | 67.64409020 | 64.56879775 | 62.13688775 |
| 729 | 85.21328439 | 78.08281365 | 72.78671244 | 68.76455202 | 65.64955747 | 63.18595177 |
| 730 | 86.42273335 | 79.21110789 | 73.85438503 | 69.78590438 | 66.63480762 | 64.14246033 |
| 731 | 87.56994506 | 80.28091591 | 74.86646451 | 70.75394803 | 67.56858941 | 65.04901469 |
| 732 | 88.66929470 | 81.30526454 | 75.83497506 | 71.67994474 | 68.46157336 | 65.91581722 |
| 733 | 89.70449390 | 82.26903893 | 76.74568143 | 72.55033371 | 69.30072636 | 66.73025635 |
| 734 | 90.64748942 | 83.14665659 | 77.57482282 | 73.34272678 | 70.06471436 | 67.47162442 |
| 735 | 91.46310917 | 83.90622046 | 78.29290699 | 74.02943544 | 70.72722730 | 68.11528645 |
| 736 | 92.11370833 | 84.51367210 | 78.86850420 | 74.58099782 | 71.26030408 | 68.63384902 |
| 737 | 92.56381531 | 84.93694479 | 79.27204129 | 74.96970572 | 71.63765730 | 69.00232905 |
| 738 | 92.78477792 | 85.15011665 | 79.47959569 | 75.17313158 | 71.83799816 | 69.20032269 |
| 739 | 92.75940930 | 85.13756383 | 79.47668943 | 75.17765551 | 71.84836140 | 69.21537414 |
| 740 | 92.48663408 | 84.89811358 | 79.26208318 | 74.98199228 | 71.66743002 | 69.04614446 |
| 741 | 91.98137325 | 84.44522101 | 78.84815940 | 74.59772278 | 71.30617482 | 68.70313077 |
| 742 | 91.25420748 | 83.78922734 | 78.24506128 | 74.03482346 | 70.77442976 | 68.19604329 |
| 743 | 90.31024286 | 82.93493363 | 77.45735667 | 73.29767961 | 70.07643428 | 67.52900243 |
| 744 | 89.15301503 | 81.88498318 | 76.48704267 | 72.38781103 | 69.21334956 | 66.70289485 |
| 745 | 87.78615803 | 80.64164014 | 75.33539780 | 71.30577370 | 68.18519316 | 65.71732979 |
| 746 | 86.21507326 | 79.20856807 | 74.00483418 | 70.05306132 | 66.99277373 | 64.57259550 |
| 747 | 84.44859841 | 77.59260864 | 72.50074977 | 68.63400701 | 65.63962543 | 63.27161566 |
| 748 | 82.50067638 | 75.80556023 | 70.83338049 | 67.05768486 | 64.13394280 | 61.82190579 |
| 749 | 80.39202417 | 73.86595651 | 69.01965246 | 65.33981156 | 62.49051524 | 60.23752963 |
| 750 | 78.15180185 | 71.80084514 | 67.08503416 | 63.50464803 | 60.73266170 | 58.54105557 |
| 751 | 75.77672214 | 69.60785761 | 65.02781820 | 61.55097152 | 58.85952058 | 56.73189593 |
| 752 | 73.15985307 | 67.18816635 | 62.75521859 | 59.39060247 | 56.78649451 | 54.72829860 |
| 753 | 70.29655069 | 64.53742337 | 60.26310994 | 57.01958674 | 54.50976385 | 52.52655181 |
| 754 | 67.30157268 | 61.76182641 | 57.65130393 | 54.53286310 | 52.12047469 | 50.21478660 |
| 755 | 64.36778133 | 59.03990042 | 55.08762764 | 52.09009420 | 49.77193418 | 47.94125683 |
| 756 | 61.72484660 | 56.58427897 | 52.77200175 | 49.88149759 | 47.64680578 | 45.88261910 |
| 757 | 59.59794909 | 54.60348574 | 50.90051886 | 48.09367672 | 45.92430462 | 44.21221270 |
| 758 | 58.16648312 | 53.26371593 | 49.62952171 | 46.87545195 | 44.74739270 | 43.06833955 |
| 759 | 57.52275969 | 52.65061777 | 49.03968149 | 46.30369154 | 44.18997429 | 42.52254419 |
| 760 | 57.63070955 | 52.73107395 | 49.10007605 | 46.34914266 | 44.22409111 | 42.54789367 |
| 761 | 58.39958383 | 53.42099952 | 49.73159790 | 46.93650066 | 44.77740220 | 43.07440621 |
| 762 | 59.97839486 | 54.85719449 | 51.06197573 | 48.18660438 | 45.96541000 | 44.21336339 |
| 763 | 62.39888135 | 57.06898891 | 53.11874650 | 50.12562569 | 47.81322646 | 45.96903670 |
| 764 | 65.51285374 | 59.92041593 | 55.77502506 | 52.63357937 | 50.20621239 | 48.29101678 |
| 765 | 69.05190118 | 63.16504868 | 58.80072191 | 55.49279069 | 52.93631365 | 50.91886329 |
| 766 | 72.68709850 | 66.50083717 | 61.91376089 | 58.43636296 | 55.74839775 | 53.62675467 |
| 767 | 76.08871320 | 69.62494518 | 64.83129696 | 61.19664512 | 58.38659013 | 56.16813804 |
| 768 | 78.98591245 | 72.28858714 | 67.32093389 | 63.55369926 | 60.64061061 | 58.34037899 |
| 769 | 81.22647001 | 74.35186500 | 69.25194201 | 65.38376825 | 62.39210977 | 60.02941141 |

| wavelength / nm | D50 | D55 | D60 | D65 | D70 | D75 |
|-----------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| 770 | 82.83647328 | 75.83860514 | 70.64647593 | 66.70774326 | 63.66100535 | 61.25438732 |
| 771 | 83.95882353 | 76.88017107 | 71.62732122 | 67.64188842 | 64.55850532 | 62.12251124 |
| 772 | 84.49800747 | 77.38967307 | 72.11395862 | 68.11049440 | 65.01260245 | 62.56468494 |
| 773 | 84.40870429 | 77.32553850 | 72.06759930 | 68.07688650 | 64.98625925 | 62.54716570 |
| 774 | 83.76904210 | 76.75867906 | 71.55383242 | 67.60264200 | 64.54397082 | 62.12603145 |
| 775 | 82.74048552 | 75.83595399 | 70.70873104 | 66.81569274 | 63.80140512 | 61.41803002 |
| 776 | 81.52772314 | 74.74363313 | 69.70495809 | 65.87842767 | 62.91504314 | 60.57142842 |
| 777 | 80.33855519 | 73.67086010 | 68.71787236 | 64.95579535 | 62.04181921 | 59.73686214 |
| 778 | 79.34378096 | 72.77311543 | 67.89163440 | 64.18340654 | 61.31076115 | 59.03818442 |
| 779 | 78.63708646 | 72.13567966 | 67.30531252 | 63.63563671 | 60.79263051 | 58.54331554 |
| 780 | 78.19493188 | 71.73709651 | 66.93898871 | 63.29372859 | 60.46956284 | 58.23509207 |
| 781 | 77.90781544 | 71.47747782 | 66.69988783 | 63.07028673 | 60.25831078 | 58.03353232 |
| 782 | 77.80319948 | 71.38128921 | 66.61029432 | 62.98597540 | 60.17831353 | 57.95713101 |
| 783 | 77.90239897 | 71.46786427 | 66.68808113 | 63.05756719 | 60.24549879 | 58.02115368 |
| 784 | 78.17523280 | 71.71016436 | 66.90850188 | 63.26202259 | 60.43812119 | 58.20485558 |
| 785 | 78.55666131 | 72.04975664 | 67.21795382 | 63.54934435 | 60.70892455 | 58.46310617 |
| 786 | 78.96342390 | 72.41179220 | 67.54774089 | 63.85543188 | 60.99730418 | 58.73801362 |
| 787 | 79.31067656 | 72.71998416 | 67.82783660 | 64.11493562 | 61.24146921 | 58.97054933 |
| 788 | 79.52862943 | 72.91158571 | 68.00064708 | 64.27411137 | 61.39060483 | 59.11217244 |
| 789 | 79.57918438 | 72.95236825 | 68.03477405 | 64.30367471 | 61.41703465 | 59.13645435 |
| 790 | 79.47257255 | 72.85159945 | 67.93877778 | 64.21165537 | 61.32838298 | 59.05070319 |
| 791 | 79.26065379 | 72.65609935 | 67.75577638 | 64.03839369 | 61.16286633 | 58.89147855 |
| 792 | 78.95425482 | 72.37596165 | 67.49528841 | 63.79294647 | 60.92916354 | 58.66714338 |
| 793 | 78.55087266 | 72.00904762 | 67.15543166 | 63.47361481 | 60.62570832 | 58.37622865 |
| 794 | 78.05107380 | 71.55571559 | 66.73643413 | 63.08054757 | 60.25260441 | 58.01881571 |
| 795 | 77.45802081 | 71.01848541 | 66.24038838 | 62.61555359 | 59.81147419 | 57.59640692 |
| 796 | 76.77699902 | 70.40170295 | 65.671100576 | 62.08191380 | 59.30530734 | 57.11179627 |
| 797 | 76.01494323 | 69.71120463 | 65.03337068 | 61.48419352 | 58.73830956 | 56.56894002 |
| 798 | 75.17996435 | 68.95398188 | 64.33369489 | 60.82805454 | 58.11575118 | 55.97282729 |
| 799 | 74.28087604 | 68.13784565 | 63.57907176 | 60.12006740 | 57.44381589 | 55.32935071 |
| 800 | 73.32672145 | 67.27109092 | 62.77723054 | 59.36752352 | 56.72944937 | 54.64517700 |
| 801 | 72.31361616 | 66.35044594 | 61.92532364 | 58.56787229 | 55.97031044 | 53.91811371 |
| 802 | 71.20622286 | 65.34367925 | 60.99345491 | 57.69301430 | 55.13971017 | 53.12260303 |
| 803 | 70.00438580 | 64.25059515 | 59.98140891 | 56.74272717 | 54.23742736 | 52.25843011 |
| 804 | 68.74779791 | 63.10738997 | 58.92275936 | 55.74857216 | 53.29344774 | 51.35432066 |
| 805 | 67.50232441 | 61.97416320 | 57.87327444 | 54.76298813 | 52.35759927 | 50.45801092 |
| 806 | 66.34632641 | 60.92242878 | 56.89932202 | 53.84838555 | 51.48918741 | 49.62631755 |
| 807 | 65.35698455 | 60.02262635 | 56.06627495 | 53.06624045 | 50.74663040 | 48.91520757 |
| 808 | 64.59662252 | 59.33163243 | 55.42691633 | 52.46618839 | 50.17709454 | 48.36986631 |
| 809 | 64.09903075 | 58.88027169 | 55.00984477 | 52.07511844 | 49.80612948 | 48.01477730 |
| 810 | 63.85578995 | 58.66082817 | 54.80787968 | 51.88626717 | 49.62730345 | 47.84377224 |
| 811 | 63.83310452 | 58.64241859 | 54.79233418 | 51.87264289 | 49.61495977 | 47.83227052 |
| 812 | 64.05746628 | 58.84921983 | 54.96564274 | 52.05533800 | 49.78913616 | 47.99946311 |

| wave-length / nm | D50 | D55 | D60 | D65 | D70 | D75 |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 813 | 64.53567391 | 59.28742524 | 55.39354566 | 52.43974602 | 50.15495531 | 48.35025663 |
| 814 | 65.23699670 | 59.92895651 | 55.98996703 | 53.00133801 | 50.68910782 | 48.86232391 |
| 815 | 66.10517935 | 60.72242784 | 56.72719401 | 53.69523643 | 51.34894934 | 49.49481759 |
| 816 | 67.07044691 | 61.60411005 | 57.54605632 | 54.46578900 | 52.08159766 | 50.19708378 |
| 817 | 68.06150958 | 62.50889468 | 58.38610556 | 55.25614260 | 52.83302983 | 50.91737566 |
| 818 | 69.01756765 | 63.38125818 | 59.19579466 | 56.01781706 | 53.55717927 | 51.61156710 |
| 819 | 69.90031637 | 64.18622597 | 59.94265722 | 56.72027911 | 54.22503287 | 52.25186630 |
| 820 | 70.70595075 | 64.92033660 | 60.62348693 | 57.36051618 | 54.83372811 | 52.83552937 |
| 821 | 71.44946287 | 65.59729783 | 61.25101843 | 57.95050828 | 55.39464780 | 53.37345633 |
| 822 | 72.08799847 | 66.17798375 | 61.78893192 | 58.45609678 | 55.87533159 | 53.83455020 |
| 823 | 72.59574341 | 66.63884178 | 62.21537333 | 58.85673278 | 56.25625384 | 54.20010484 |
| 824 | 72.97993651 | 66.98651827 | 62.53653376 | 59.15824928 | 56.54296011 | 54.47543019 |
| 825 | 73.26938141 | 67.24736372 | 62.77690399 | 59.38369404 | 56.75735557 | 54.68150714 |
| 826 | 73.50295842 | 67.45693800 | 62.96952902 | 59.56416245 | 56.92899338 | 54.84664243 |
| 827 | 73.71813639 | 67.64951559 | 63.14626248 | 59.72963037 | 57.08636304 | 54.99812360 |
| 828 | 73.93948458 | 67.84759083 | 63.32802126 | 59.89978700 | 57.24817880 | 55.15387387 |
| 829 | 74.16718450 | 68.05138318 | 63.51503987 | 60.07486770 | 57.41466799 | 55.31410708 |
| 830 | 74.36554178 | 68.22834239 | 63.67712507 | 60.22648691 | 57.55885943 | 55.45298256 |

ANNEXE V

CALCULATION OF THE SPECTRAL POWER DISTRIBUTION OF A PHASE OF DAYLIGHT WITH ARBITRARY EQUALLY SPACED SAMPLING

As shown by Equation 1 of the present report the spectral power distribution (SPD) can be composed by proper weighting of three eigenvectors:

$$S(\lambda) = S_0(\lambda) + M_1 S_1(\lambda) + M_2 S_2(\lambda)$$

The eigenvectors, calculated from the original 10 nm spaced tables to 1 nm values, interpolated by Sprague interpolation, are reproduced in Table 1 of the present report.

The factors M_1 and M_2 depend on one side on the chromaticity co-ordinates of the phase of daylight, and CIE Publication 15:2004 contains these for the original 10 nm steps. For other wavelength intervals it is necessary to exchange the numbers in Equations 2 and 3 of the present report with other values. The steps required to obtain the proper numbers are described in the following:

A general form for factors M_1 and M_2 is:

$$M_n = \frac{g_n x_D + h_n y_D + i_n}{j x_D + k y_D + l}$$

where $n = 1$ stands for M_1 (Equation 2 of present report) and $n = 2$ for M_2 (Equation 3 of present report).

$g_1, h_1, i_1, g_2, h_2, i_2, j, k$ and l are obtained as the tristimulus values of the $S_0(\lambda), S_1(\lambda), S_2(\lambda)$ functions in the following form:

$$g_1 = B_0 D_2 - B_2 D_0$$

$$h_1 = A_2 D_0 - A_0 D_2$$

$$i_1 = A_0 B_2 - A_2 B_0$$

$$g_2 = B_1 D_0 - B_0 D_1$$

$$h_2 = A_0 D_1 - A_1 D_0$$

$$i_2 = A_1 B_0 - A_0 B_1$$

$$j = B_2 D_1 - B_1 D_2$$

$$k = A_1 D_2 - A_2 D_1$$

$$l = A_2 B_1 - A_1 B_2$$

where

$$A_i = \sum_{\lambda=380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} S_i(\lambda) \overline{x}(\lambda) d\lambda = \langle S_i, \overline{x} \rangle$$

$$B_i = \sum_{\lambda=380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} S_i(\lambda) \overline{y}(\lambda) d\lambda = \langle S_i, \overline{y} \rangle$$

$$C_i = \sum_{\lambda=380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} S_i(\lambda) \overline{z}(\lambda) d\lambda = \langle S_i, \overline{z} \rangle$$

for $i = 0, 1$ and 2 .

Using the abbreviation introduced in Equation A.12 to A.14 above all the sums are abbreviated in a similar form as:

$$\begin{aligned} A_0 &= \langle S_0, \overline{x} \rangle, & A_1 &= \langle S_1, \overline{x} \rangle, & A_2 &= \langle S_2, \overline{x} \rangle, \\ B_0 &= \langle S_0, \overline{y} \rangle, & B_1 &= \langle S_1, \overline{y} \rangle, & B_2 &= \langle S_2, \overline{y} \rangle, \\ C_0 &= \langle S_0, \overline{z} \rangle, & C_1 &= \langle S_1, \overline{z} \rangle, & C_2 &= \langle S_2, \overline{z} \rangle, \\ D_0 &= A_0 + B_0 + C_0, & D_1 &= A_1 + B_1 + C_1, & D_2 &= A_2 + B_2 + C_2 \end{aligned}$$

By the use of these values for any correlated colour temperature, T_{cor} , and step size, the coefficients M_1 and M_2 can be determined, and the spectral power distribution of the phase of daylight can be calculated using Equation A.1.

Table A.1 contains values of the coefficients defined in Equations A.3 to A.11 for the CIE 1931 standard observer for both 1 nm and 5 nm step-size tables.

An Excel® file can be downloaded at <http://www.cie.co.at/index.php/DOWNLOADS/TC1-74> that will provide the SPD of the daylight illuminant for the different interpolation methods described in this report after input of a required CCT.

Table A.1 – Values of coefficients for the calculation of M_1 and M_2 for CIE 1931 standard observers (1 nm standard tables) using the Sprague interpolated $S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$ and $S_2(\lambda)$ functions both for 1 nm and 5 nm sampling

| Coefficient | CIE 1931 Standard Observer 1 nm sampling | CIE 1931 Standard Observer 5 nm sampling |
|------------------|---|---|
| \overline{x}_1 | -1,778 79 | -1,778 71 |
| h_1 | 5,907 89 | 5,907 85 |
| i_1 | -1,346 85 | -1,346 85 |
| \overline{x}_2 | -31,442 47 | -31,442 79 |
| h_2 | 30,063 22 | 30,063 28 |
| i_2 | 0,035 78 | 0,035 85 |
| j | 0,255 36 | 0,255 36 |
| k | -0,732 11 | -0,732 12 |
| l | 0,023 87 | 0,023 87 |

ANNEXE VI

CERTIFICAT DE CALIBRATION DE SPECTRASUITE

| | |
|---|---|
|  | Ocean Optics, Inc. Calibration Laboratories Located in: Dunedin, Florida Winter Park, Florida Ostfildern, Germany Shanghai, PRC |
|---|---|

Certificate of Calibration

Date: 5/14/2012

Certificate #: 12525

| | | | |
|---|---|---|---|
| Customer Information | | Fax | |
| OOI WINTER PARK 4301 METRIC DRIVE WINTER PARK, FL 32782 | | | |
| General Information | | | |
| Serial Number: | LSC11994 | Manufacturer: | OCEAN OPTICS INC. |
| Description: | RADIOMETRIC CALIBRATION STANDARD: VIS-NIR | | |
| Model Number: | LS-1-CAL-INT | Performed By: | BERNARDA CYGAN |
| Nomenclature: | LIGHT SOURCE | Signature: |  |
| Temp./RH: | 74 F / 53 | Calibration Result: | PASS |
| Cal. Interval: | 50 HOURS | As Found and As Left data are the same unless indicated otherwise in Calibration Notes. | |
| Cal. Date: | 5/14/2012 | | |
| Cal. Due Date: | | | |

Recalibration recommended after 50 hours of use.
Calibrated Range: 300-1050 nm.

| Calibration Used to Calibrate Equipment | | | | |
|---|--------------|---------------------------------|-----------|-----------|
| Item ID | Model Number | Description | Cal. Exp. | Cal. Due |
| 11006045 | TH803 | TEMPERATURE / HUMIDITY RECORDER | 2/24/2012 | 8/24/2012 |
| HR+C1757 | HR2000+ | SPECTROMETER, HIGH RESOLUTION | 5/14/2012 | |

| Work Order Used in This Event | | | |
|-------------------------------|---|----------|-----------------|
| Item | Time | Operator | Equipment Model |
| MET.007 | CAL OF LS-1-CAL-INT AND HL-2000-CAL-INT | 0 | 6/4/2007 |

Ocean Optics Inc. is an ISO9001:2008 certified company. All radiometric calibrations were performed in compliance with National Institute of Standards & Technology practices recommended in NIST Handbook 150-2E, Technical Guide for Optical Radiation Measurements. All standards used are traceable to the National Institute of Standards & Technology; or an equivalent national organization, if the standard was calibrated outside the US; or have been derived from accepted values of naturally occurring physical constants. Ocean Optics Inc. responsibilities shall in no event, nor for cause whatsoever exceed the cost of the service represented. This report applies only to the item(s) identified above, at the time of calibration. This report shall not be reproduced, except in full, without written permission from Ocean Optics Inc.

ANNEXE VII

QUELQUES SECTIONS DES FICHES TECHNIQUES DES DELs COMPOSANT LE SIMULATEUR SOLAIRE D65 A QUATORZE DELs



ROITHNER LASERTECHNIK GmbH
WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA
TEL. +43 1 506 52 43 -0, FAX. +43 1 506 52 43 -100 OFFICE@ROITHNER-LASER.COM



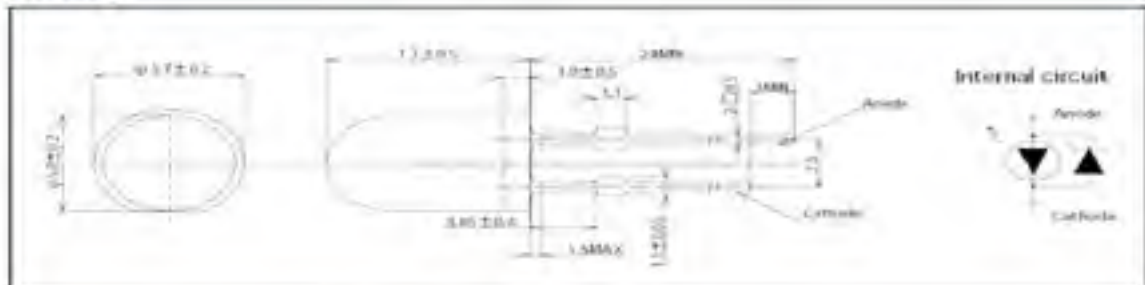
XSL-365-5E



TECHNICAL DATA

UV LED 5 mm

Drawing



Absolute Maximum Ratings ($T_a = 25^\circ\text{C}$)

| Item | Symbol | Value | Unit |
|--|-----------|-------------|------------------|
| DC Forward Current | I_F | 25 | mA |
| Peak Pulse Forward Current ^{*1} | I_{PP} | 100 | mA |
| Power Dissipation | P_F | 100 | mW |
| Operating Temperature | T_{OP} | -30 ... +80 | $^\circ\text{C}$ |
| Storage Temperature | T_{STG} | -30 ... +85 | $^\circ\text{C}$ |
| Soldering Temperature ^{*2} | T_{SOL} | 260 | $^\circ\text{C}$ |

^{*1} pulse width ≤ 0.1 ms, duty ratio $\leq 1/10$

^{*2} for 10 sec.

Specifications ($I_F = 20\text{mA}$, $T_a = 25^\circ\text{C}$)

| Item | Symbol | Min. | Typ. | Max. | Unit |
|---------------------------------|-------------|------|------|------|------|
| Electrical Specification | | | | | |
| Forward Voltage ^{*1} | U_F | 3.2 | 3.6 | 4.2 | V |
| Optical Specification | | | | | |
| Optical Power | P_O | 2.4 | - | 6.0 | mW |
| Peak Wavelength ^{*2} | λ_P | 363 | - | 370 | nm |
| Spectral Half Width (FWHM) | Δ | 10 | - | 20 | nm |
| Viewing Angle | Φ | - | 15 | - | deg. |

^{*1} Note:

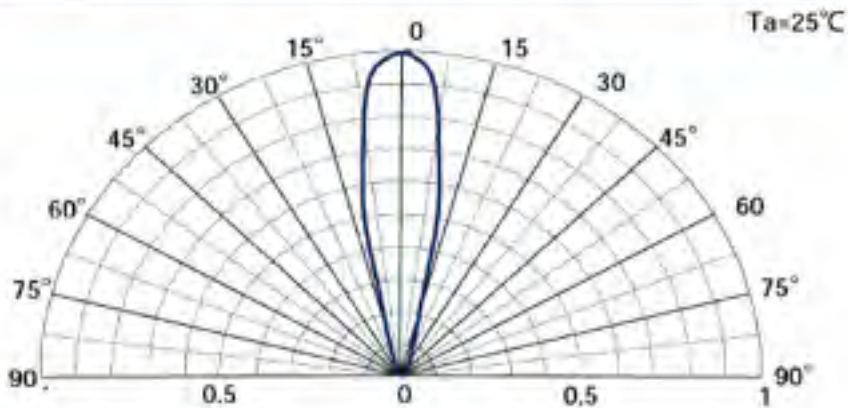
1. measurement tolerance is ± 0.2 V

2. measurement tolerance is ± 2 nm


ROITHNER LASERTECHNIK GmbH

 WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA
 TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM


directivity:



Device Materials

| Item | Material |
|------------------------------|-----------------|
| Encapsulation | Silicone Resin |
| Lead frame | Fe + Ag coating |
| XSL 365-SE is RoHS compliant | |

Precaution for Use

1. Cautions

- This device is a UV LED, which radiates intense UV light during operation.
- DO NOT look directly into the UV light or look through the optical system. To prevent inadequate exposure of UV radiation, wearing UV protective glasses is recommended

2. Lead Forming

- When forming leads, the leads should be bent at a point at least 3 mm from the base of the lead. DO NOT use the base of the leadframe as a fulcrum during lead forming.
- Lead forming should be done before soldering.
- DO NOT apply any bending stress to the base of the lead. The stress to the base may damage the LED's characteristics or it may break the LEDs.
- When mounted the LEDs onto the printed circuit board, the holes on the circuit board should be exactly aligned with the leads of LEDs. If the LEDs are mounted with stress at the leads, it causes deterioration of the lead and it will degrade the LEDs.


ROITHNER LASERTECHNIK GmbH

WIEDNER HAUPTSTRASSE 76

1040 VIENNA

AUSTRIA

TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM



VL400-5-15



TECHNICAL DATA

UV LED, 5 mm
InGaN

Features

- Zener diode is built in the protective circuit against static electricity
- Low Voltage DC Operated
- High Power Intensity
- Complies with RoHS Directive



Specifications (25°C)

| Item | Symbol | Value | Unit |
|------------------------------------|-----------|--------------|------|
| Absolute Maximum Ratings | | | |
| DC Forward Current | I_F | 30 | mA |
| Peak Pulse Forward Current * | I_{FP} | 100 | mA |
| Allowable Reverse Current | I_R | 50 | mA |
| Power Dissipation | P_D | 80 | mW |
| Operating Temperature | T_{OP} | -40 ... +85 | °C |
| Storage Temperature | T_{STG} | -40 ... +100 | °C |
| Soldering Temperature (for 5 sec.) | T_{SOL} | 260 ± 5 | °C |

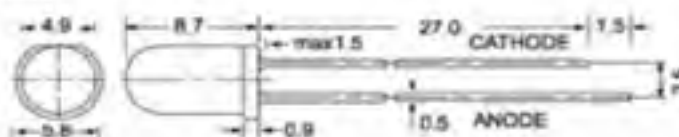
* Note: 1/10 duty cycle, 0.1 ms pulse width

| Item | Symbol | Min. | Typ. | Max. | Unit |
|----------------------------------|-------------|------|------|------|------|
| Optical Specifications | | | | | |
| CW Output Power *1 | P_O | 8.0 | - | 12.0 | mW |
| Peak Wavelength *2 | λ_P | 395 | 400 | 405 | nm |
| Viewing Angle | Φ | | 15 | | deg. |
| Electrical Specifications | | | | | |
| Forward Current | I_F | - | 20 | - | mA |
| Forward Voltage *3 | V_F | 3.2 | - | 4.2 | V |

* Note:

1. Peak wavelength measurement allowance is ± 2 nm
2. Optical output measurement allowance is ± 10%
3. Forward voltage measurement allowance is ± 0.2 V

Outline Dimensions




ROITHNER LASERTECHNIK GmbH

 WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA
 TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM


Reliability

1. Test item and result

| No. | Test Item | Standard Test Methode | Test Conditions | Note | Sample | Pass |
|-----|--------------------------------|-----------------------|--|--------------|--------|------|
| 1 | Steady State operating Life | Internal Ref. | $I_F=20\text{mA}$, $T_a=25^\circ\text{C}$ | 1000 Hr | 20 | OK |
| 2 | Soldering Test | JEITA ED-4701 330 302 | $T_{\text{sol}}=260 \pm 5^\circ\text{C}$, 3sec 3mm from the base of the epoxy bulb | 2 Times | 60 | OK |
| 3 | Thermal Shock | JESD22-A106-A | $-40^\circ\text{C} \dots +85^\circ\text{C}$ | 84 Cycles | 20 | OK |
| 4 | Temperature Cycle | JESD22-A104-A | $-35^\circ\text{C} \dots +75^\circ\text{C}$ | 168 Cycles | 20 | OK |
| 5 | High Temperature Storage | JESD22-A103-A | $T_{\text{stg}}=100^\circ\text{C}$ | 1000 Hr | 20 | OK |
| 6 | Low Temperature Storage | Internal Ref. | $T_{\text{stg}}=-40^\circ\text{C}$ | 1000 Hr | 20 | OK |
| 7 | High Temperature High Humidity | JESD22-A101-B | $T_a=85^\circ\text{C}$, $\text{RH}=85\%$ | 1000 Hr | 20 | OK |
| 8 | On-Off Test | Internal Ref. | 2sec ON, 2sec OFF $I_F=20\text{mA}$ | 100000 cycle | 20 | OK |

2. Criteria for judging the damage

| Item | Symbol | Test Conditions | Criteria for Judgment | |
|----------------------|--------|-------------------|-----------------------|-------------|
| | | | Min. | Max. |
| Forward Voltage | V_F | $I_F=20\text{mA}$ | - | U.S.L x 1.1 |
| Optical Power Output | P_O | $I_F=20\text{mA}$ | L.S.L x 0.7 | - |

* Note:

1. U.S.L: Upper Standard Level
2. L.S.L: Lower Standard Level



Precaution for Use

1. Cautions

- This device is a UV LED, which radiates UV light during operation.
- DO NOT look directly into the UV light or look through the optical system. To prevent in adequate exposure of UV radiation, wear UV protective glasses.

2. Lead Forming

- When forming leads, the leads should be bent at a point at least 3 mm from the base of the lead. DO NOT use the base of the leadframe as a fulcrum during lead forming.
- Lead forming should be done before soldering.
- DO NOT apply any bending stress to the base of the lead. The stress to the base may damage the LED's characteristics or it may break the LEDs.
- When mounted the LEDs onto the printed circuit board, the holes on the circuit board should be exactly aligned with the leads of LEDs. If the LEDs are mounted with stress at the leads, it causes deterioration of the lead and it will degrade the LEDs.

3. Soldering Conditions

- Solder the LEDs no closer than 3 mm from the base of the lead.
- Recommended soldering conditions:

| Dip Soldering | |
|-------------------------|--|
| Pre-Heat | 120 °C Max. |
| Pre-Heat Time | 60 Seconds Max. |
| Solder Bath Temperature | 260 °C Max. |
| Dipping Time | 5 Seconds Max. |
| Dipping Position | No lower than 3 mm from the base of the epoxy bulb |

- DO NOT apply any stress to the lead particularly when heat.
- The LEDs must not be reposition after soldering.
- After soldering the LEDs, the lead should be protected from mechanical shock or vibration until the LEDs return to room temperature.
- When it is necessary to clamp the LEDs to prevent soldering failure, it is important to minimize the mechanical stress on the LEDs.
- Cut the LED leads at room temperature. Cutting the leads at high temperature may cause the failure of the LEDs.

4. Static Electricity

- The LEDs are very sensitive to Static Electricity and surge voltage. So it is recommended that a wrist band or an anti-electrostatic glove be used when handling the LEDs.
- All devices, equipment and machinery must be grounded properly. It is recommended that precautions should be taken against surge voltage to the equipment that mounts the LEDs.

5. Heat Generation

- The powered LEDs generate heat. Heat dissipation should be considered in the application design to avoid the environmental conditions for operation in excess of the absolute maximum ratings.


ROITHNER LASERTECHNIK GmbH

 WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA
 TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM


B5-433-B505



TECHNICAL DATA

LED, 5 mm
InGaN

B5-433-B505 is a InGaN LED mounted on a lead frame with a clear epoxy lens. On forward bias it emits a band of green light with a peak at 507 nm.

Specifications

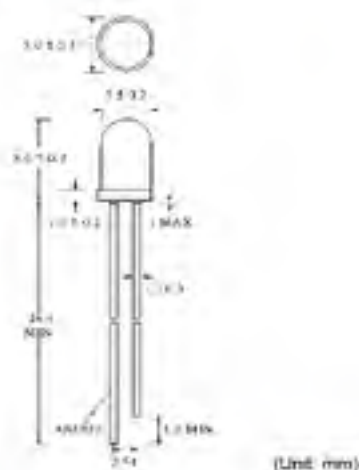
- Structure: InGaN
- Peak Wavelength: typ. 507 nm
- Optical Output Power: typ. 8.5 cd
- Package: 5 mm clear epoxy

Absolute Maximum Ratings ($T_a=25^\circ\text{C}$)

| Item | Symbol | Value | Unit |
|--------------------------------------|-----------|--------------|------------------|
| Power Dissipation | P_D | 120 | mW |
| Forward Current | I_F | 30 | mA |
| Pulse Forward Current ^{*1} | I_{FP} | 100 | mA |
| Reverse Voltage | V_R | 5 | V |
| Operating Temperature | T_{OP} | -40 ... +85 | $^\circ\text{C}$ |
| Storage Temperature | T_{STG} | -40 ... +100 | $^\circ\text{C}$ |
| Soldering Temperature ^{**2} | T_{SOL} | 260 | $^\circ\text{C}$ |

^{*1} 1/10 duty cycle @ 1 KHz

^{**2} 1.6mm from body, must be completed within 3 seconds



(Unit: mm)

Electro-Optical Characteristics

| Item | Symbol | Condition | Min. | Typ. | Max. | Unit |
|---------------------|-----------------|-----------------------|------|------|------|---------------|
| Forward Voltage | V_F | $I_F = 20 \text{ mA}$ | - | 3.2 | 3.8 | V |
| Reverse Current | I_R | $V_R = 5 \text{ V}$ | - | - | 10 | μA |
| Luminous Intensity | I_V | $I_F = 20 \text{ mA}$ | 5.6 | 8.5 | - | cd |
| Peak Wavelength | λ_p | $I_F = 20 \text{ mA}$ | - | 507 | - | nm |
| Dominant Wavelength | λ_D | $I_F = 20 \text{ mA}$ | - | 505 | - | nm |
| Half Width | $\Delta\lambda$ | $I_F = 20 \text{ mA}$ | - | 30 | - | nm |
| Viewing Angle * | $2\theta_{1/2}$ | $I_F = 20 \text{ mA}$ | - | 15 | - | deg |

* Tolerance: -10 / +5 deg.

Notes

- Do not view directly into the emitting area of the LED during operation!
- The above specifications are for reference purpose only and subjected to change without prior notice.



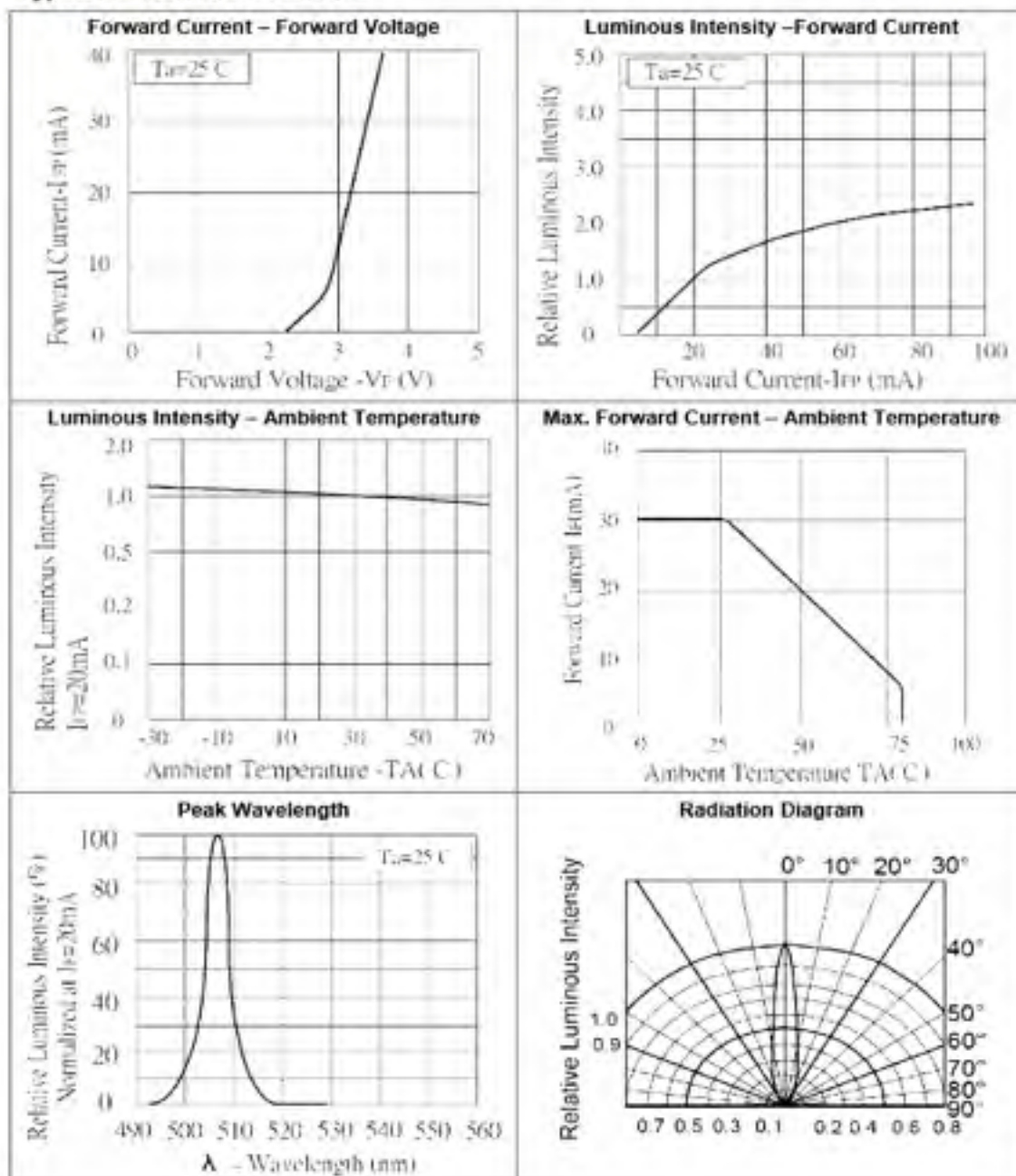

ROITHNER LASERTECHNIK GmbH

WIEDNER HAUPTSTRASSE 76

1040 VIENNA

AUSTRIA

TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM


Typical Performance Curves




Cree® 5-mm Blue and Green Round LED C503B-BAS/BAN/GAS/GAN (15 degrees) C503B-BCS/BCN/GCS/GCN (30 degrees) Data Sheet

Round LEDs offer superior light output for excellent readability in sunlight and dependable performance. They provide extremely stable light output over long periods of time.

These lamps are made with an advanced optical-grade epoxy offering superior high-temperature and high-moisture-resistance performance in outdoor signal and sign applications.



- | FEATURES | APPLICATIONS |
|---|------------------------------------|
| • Size (mm): 5 | • Electronic Signs & Signals (ESS) |
| • Color and Typical Dominant Wavelength (nm): | • Motorway Signs |
| • Blue (470) | • Variable-Message Sign (VMS) |
| • Green (527) | • Advertising Signs |
| • Luminous Intensity (mcd) | • Petrol Signs |
| • C503B-BAS/BAN (5860-32900) | • Amusement |
| • C503B-BCS/BCN (2130-12000) | |
| • C503B-GAS/GAN (16800-90500) | |
| • C503B-GCS/GCN (5860-32900) | |
| • Viewing Angle: | |
| • C503B-BAS/BAN/GAS/GAN: 15 degrees | |
| • C503B-BCS/BCN/GCS/GCN: 30 degrees | |
| • Lead-Free | |
| • RoHS-Compliant | |



Absolute Maximum Ratings ($T_A = 25^\circ\text{C}$)

| Items | Symbol | Absolute Maximum Rating | Unit |
|-------------------------------------|-----------|---|------------------|
| | | Blue/Green | |
| Forward Current | I_F | 25 | mA |
| Peak Forward Current ^{max} | I_{FM} | 100 | mA |
| Reverse Voltage | V_R | 5 | V |
| Power Dissipation | P_D | 100 | mW |
| Operation Temperature | T_{op} | -40 ~ +95 | $^\circ\text{C}$ |
| Storage Temperature | T_{stg} | -40 ~ +100 | $^\circ\text{C}$ |
| Lead Soldering Temperature | T_{sol} | Max. 260 $^\circ\text{C}$ for 3 sec. max. (3 mm from the base of the epoxy bulb) | |

Note:

1. Pulse width ≤ 0.1 msec, duty $\leq 1/10$.

Typical Electrical & Optical Characteristics ($T_A = 25^\circ\text{C}$)

| Characteristics | Color | Symbol | Condition | Unit | Minimum | Typical | Maximum |
|----------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------|---------------|---------|---------|---------|
| Forward Voltage | Blue/Green | V_F | $I_F = 20$ mA | V | | 3.2 | 4.0 |
| Reverse Current | Blue/Green | I_R | $V_R = 5$ V | μA | | | 100 |
| Dominant Wave-length | Blue | λ_D | $I_F = 20$ mA | nm | 465 | 470 | 480 |
| | Green | λ_D | $I_F = 20$ mA | nm | 520 | 527 | 535 |
| Luminous Intensity | Blue | CS03B-BAS/BAN (15 degree) | I_F | $I_F = 20$ mA | mcd | 5860 | 11000 |
| | | CS03B-BCS/BCN (30 degree) | I_F | $I_F = 20$ mA | mcd | 2130 | 4100 |
| | Green | CS03B-GAS/GAN (15 degree) | I_F | $I_F = 20$ mA | mcd | 16800 | 34000 |
| | | CS03B-GCS/GCN (30 degree) | I_F | $I_F = 20$ mA | mcd | 5860 | 12500 |
| 50% Power Angle | CS03B-BAS/BAN/GAS/GAN | | $2\theta_{1/2}$ | $I_F = 20$ mA | deg | 15 | |
| | CS03B-BCS/BCN/GCS/GCN | | $2\theta_{1/2}$ | $I_F = 20$ mA | deg | 30 | |



Intensity Bin Limit ($I_f = 20 \text{ mA}$)

Blue

C503B-BAS/BAN (15 degree)

| Bin Code | Min.(mcd) | Max.(mcd) |
|----------|-----------|-----------|
| Y0 | 5860 | 8200 |
| Z0 | 8200 | 12000 |
| A0 | 12000 | 16800 |
| B0 | 16800 | 23500 |
| C0 | 23500 | 32900 |

C503B-BCS/BCN (30 degree)

| Bin Code | Min.(mcd) | Max.(mcd) |
|----------|-----------|-----------|
| Y0 | 2130 | 3000 |
| W0 | 3000 | 4180 |
| X0 | 4180 | 5860 |
| Y0 | 5860 | 8200 |
| Z0 | 8200 | 12000 |

Green

C503B-GAS/GAN (15 degree)

| Bin Code | Min.(mcd) | Max.(mcd) |
|----------|-----------|-----------|
| B0 | 16800 | 23500 |
| C0 | 23500 | 32900 |
| D0 | 32900 | 46100 |
| E0 | 46100 | 64600 |
| F0 | 64600 | 90500 |

C503B-GCS/GCN (30 degree)

| Bin Code | Min.(mcd) | Max.(mcd) |
|----------|-----------|-----------|
| Y0 | 5860 | 8200 |
| Z0 | 8200 | 12000 |
| A0 | 12000 | 16800 |
| B0 | 16800 | 23500 |
| C0 | 23500 | 32900 |

Tolerance of measurement of luminous intensity is $\pm 15\%$.

Color Bin Limit ($I_f = 20 \text{ mA}$)

Blue

| Bin Code | Min.(nm) | Max.(nm) |
|----------|----------|----------|
| B4 | 465 | 470 |
| B5 | 470 | 475 |
| B6 | 475 | 480 |

Green

| Bin Code | Min.(nm) | Max.(nm) |
|----------|----------|----------|
| G7 | 520 | 525 |
| G8 | 525 | 530 |
| G9 | 530 | 535 |

Tolerance of measurement of dominant wavelength is $\pm 1 \text{ nm}$.



Graphs

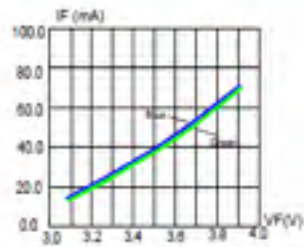


FIG. 1 FORWARD CURRENT VS. FORWARD VOLTAGE.

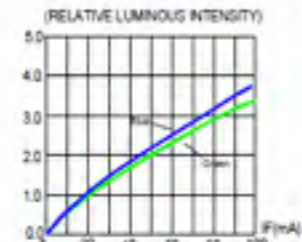


FIG. 2 RELATIVE LUMINOUS INTENSITY VS. FORWARD CURRENT

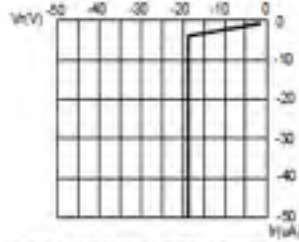


FIG. 3 BLUE/GREEN REVERSE CURRENT VS. REVERSE VOLTAGE.

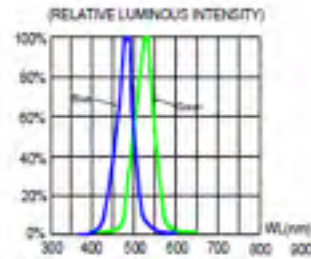


FIG. 4 RELATIVE LUMINOUS INTENSITY VS. WAVELENGTH

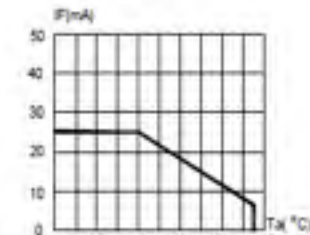


FIG. 5 BLUE & GREEN MAXIMUM FORWARD CURRENT VS. AMBIENT TEMPERATURE (T_j max = 125 °C)

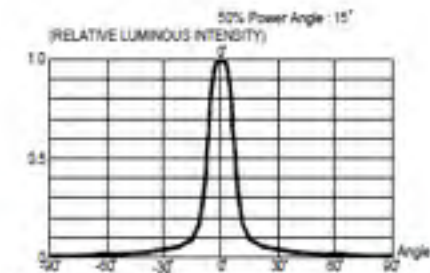


FIG. 6 FAR FIELD PATTERN

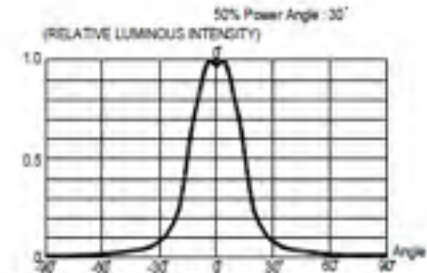


FIG. 7 FAR FIELD PATTERN

The above data are collected from statistical figures that do not necessarily correspond to the actual parameters of each single LED. Hence, these data will be changed without further notice.

Round Through-Hole LED Lamp (5 mm)



OVLFX3C7 Series

- High brightness with well-defined spatial radiation patterns
- UV-resistant epoxy lens
- 30° Beam Angle

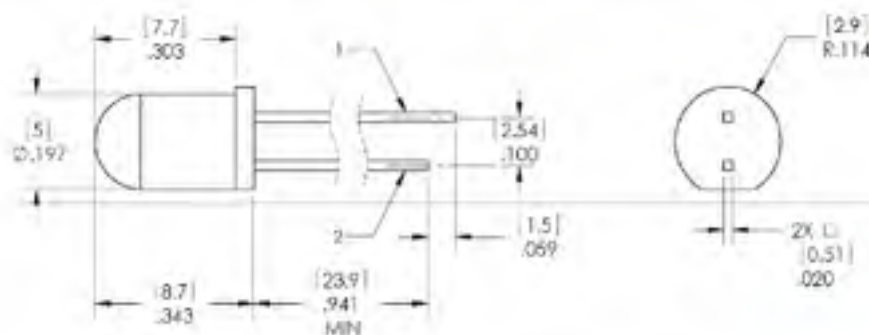


Each device in the OVLFX3C7 series is a high-intensity LED mounted in a clear plastic T-1 $\frac{1}{2}$ package. The LED provides a well-defined and even emission pattern. The UV-resistant epoxy lens makes this device an optimal solution for outdoor applications.

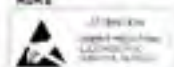
Applications

- Traffic and pedestrian signals
- Signage and architectural lighting
- Backlighting
- Automotive

| Part Number | Material | Emitted Color | Intensity Typ. mod | Lens Color |
|-------------|----------|---------------|--------------------|------------|
| OVLFB3C7 | InGaN | Blue | 5,200 | Clear |
| OVLFG3C7 | InGaN | Green | 16,000 | Clear |
| OVLFR3C7 | AlInGaP | Red | 7,400 | Clear |
| OVLFY3C7 | AlInGaP | Yellow | 7,400 | Clear |



RoHS



Leadframe material is iron alloy with tin-plated leads.

**DO NOT LOOK DIRECTLY
AT LED WITH UNSHIELDED
EYES OR DAMAGE TO
RETINA MAY OCCUR.**

OPTEK reserves the right to make changes at any time in order to improve design and to supply the best product possible.

Round Through-Hole LED Lamp

OVLFx3C7 Series



Absolute Maximum Ratings

$T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

| | | |
|---|-------------|-------------------|
| Storage Temperature Range | | -40 ~ +100 °C |
| Operating Temperature Range | | -40 ~ +100 °C |
| Reverse Voltage | | 5 V |
| Continuous Forward Current | Blue, Green | 25 mA |
| | Red, Yellow | 50 mA |
| Peak Forward Current (10% Duty Cycle, 1 kHz) | Blue, Green | 100 mA |
| | Red, Yellow | 100 mA |
| Power Dissipation | Blue, Green | 100 mW |
| | Red, Yellow | 120 mW |
| Current Linearity vs Ambient Temperature | Blue, Green | -0.29 mA/°C |
| | Red, Yellow | -0.72 mA/°C |
| Electrostatic Discharge Classification (JEDEC-JESD22-A114F) | | Class 1C |
| LED Junction Temperature | | 125°C |
| Lead Soldering Temperature (4 mm from the base of the epoxy bulb) | | 260°C / 5 seconds |

Electrical Characteristics

$T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

| SYMBOL | PARAMETER | COLOR | MIN | TYP | MAX | UNITS | CONDITIONS | | |
|---------------------|---------------------|--------|-------|--------|-----|---------------|----------------------|--|--|
| I_v | Luminous Intensity | Blue | 3,115 | 5,200 | — | mcd | $I_f = 20\text{ mA}$ | | |
| | | Green | 8,550 | 16,000 | — | | | | |
| | | Red | 4,360 | 7,400 | — | | | | |
| | | Yellow | 4,360 | 7,400 | — | | | | |
| V_f | Forward Voltage | Blue | 2.6 | 3.4 | 4.0 | V | $I_f = 20\text{ mA}$ | | |
| | | Green | | | | | | | |
| | | Red | 1.8 | 2.0 | 2.4 | | | | |
| | | Yellow | | | | | | | |
| I_k | Reverse Current | Blue | — | — | 10 | μA | $V_R = 5\text{ V}$ | | |
| | | Green | | | | | | | |
| | | Red | | | | | | | |
| | | Yellow | | | | | | | |
| λ_c | Dominant Wavelength | Blue | 460 | 470 | 475 | nm | $I_f = 20\text{ mA}$ | | |
| | | Green | 519 | 525 | 531 | | | | |
| | | Red | 620 | 623 | 630 | | | | |
| | | Yellow | 585 | 589 | 595 | | | | |
| $\Delta\lambda$ | Spectra Half Width | Blue | — | 25 | — | nm | $I_f = 20\text{ mA}$ | | |
| | | Green | | | | | | | |
| | | Red | | | | | | | |
| | | Yellow | | | | | | | |
| 2θ _{99H-H} | 50% Power Angle | | — | 30 | — | deg | $I_f = 20\text{ mA}$ | | |

OPTeK reserves the right to make changes at any time in order to improve design and to supply the best product possible.

Round Through-Hole LED Lamp

OVLFX3C7 Series



Standard Bins

LEDs are sorted to luminous intensity (I_V), forward voltage (V_F) and dominant wavelength (nm) bins listed below. Each bag consists of a single intensity bin, single voltage bin and a single color bin. Orders are filled using all intensity and color bins listed in the following tables. Optek will not accept orders for single intensity bins, single voltage bins or single color bins.

Luminous Intensity (I_V) @ 20mA

| BLUE: OVLFB3C7 | | |
|-----------------|-----------|-----------|
| IV Code | Min (mcd) | Max (mcd) |
| DV | 3,115 | 4,360 |
| OW | 4,360 | 6,105 |
| OX | 6,105 | 8,550 |
| OY | 8,550 | 11,970 |
| | | |
| GREEN: OVLFG3C7 | | |
| IV Code | Min (mcd) | Max (mcd) |
| OY | 8,550 | 11,970 |
| OZ | 11,970 | 16,758 |
| Z1 | 16,758 | 23,500 |
| Z2 | 23,500 | 32,800 |

Forward Voltage (V_F)

| BLUE: OVLFB3C7 & GREEN: OVLFG3C7 | | |
|----------------------------------|-----|-----|
| VF Code | Min | Max |
| A | 2.6 | 2.8 |
| B | 2.8 | 3.0 |
| C | 3.0 | 3.2 |
| D | 3.2 | 3.4 |
| E | 3.4 | 3.6 |
| F | 3.6 | 3.8 |
| G | 3.8 | 4.0 |

Dominant Wavelength (nm)

| BLUE: OVLFB3C7 | | |
|-----------------|----------|----------|
| Color Code | Min (nm) | Max (nm) |
| BC | 460 | 465 |
| BD | 465 | 470 |
| BE | 470 | 475 |
| | | |
| GREEN: OVLFG3C7 | | |
| Color Code | Min (nm) | Max (nm) |
| FB | 519 | 523 |
| FC | 523 | 527 |
| FD | 527 | 531 |

Luminous Intensity (I_V) @ 20mA

| RED: OVLFR3C7 | | |
|------------------|-----------|-----------|
| IV Code | Min (mcd) | Max (mcd) |
| DW | 4,360 | 6,105 |
| OX | 6,105 | 8,550 |
| OY | 8,550 | 11,970 |
| OZ | 11,970 | 16,758 |
| | | |
| YELLOW: OVLFY3C7 | | |
| IV Code | Min (mcd) | Max (mcd) |
| DW | 4,360 | 6,105 |
| OX | 6,105 | 8,550 |
| OY | 8,550 | 11,970 |
| OZ | 11,970 | 16,758 |

Forward Voltage (V_F)

| RED: OVLFR3C7 & YELLOW: OVLFY3C7 | | |
|----------------------------------|-----|-----|
| VF Code | Min | Max |
| A | 1.8 | 2.0 |
| B | 2.0 | 2.2 |
| C | 2.2 | 2.4 |

Dominant Wavelength (nm)

| RED: OVLFR3C7 | | |
|------------------|----------|----------|
| Color Code | Min (nm) | Max (nm) |
| RA | 620 | 625 |
| RB | 625 | 630 |
| | | |
| YELLOW: OVLFY3C7 | | |
| Color Code | Min (nm) | Max (nm) |
| YC | 585 | 587 |
| YD | 587 | 589 |
| YE | 589 | 591 |
| YF | 591 | 593 |
| YG | 593 | 595 |

OPTEK reserves the right to make changes at any time in order to improve design and to supply the best product possible.

Round Through-Hole LED Lamp

OVLFX3C7 Series



Typical Electro-Optical Characteristics Curves (YELLOW)

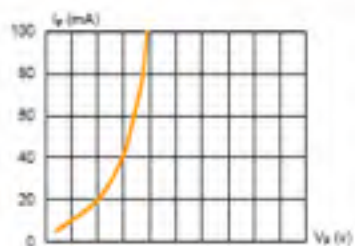


Fig.1 Forward Current vs. Forward Voltage

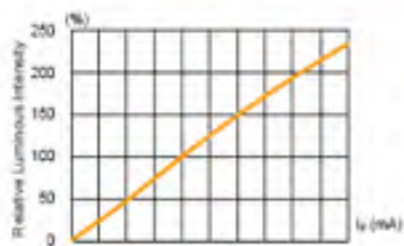


Fig.2 Luminous Intensity vs. Forward Current

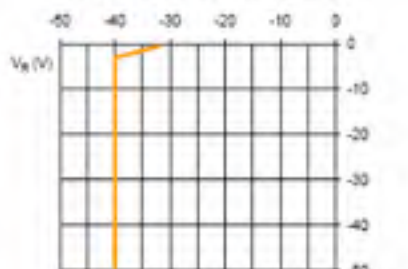


Fig.3 Reverse Current vs. Reverse Voltage

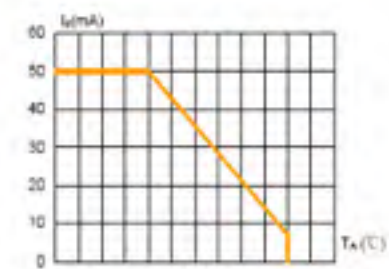


Fig.4 Allowable Forward Current vs. Ambient Temperature

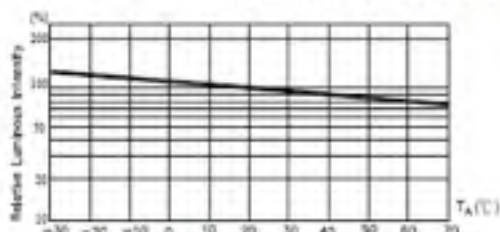


Fig.5 Luminous Intensity at $I_F = 20\text{mA}$ vs. Ambient Temperature

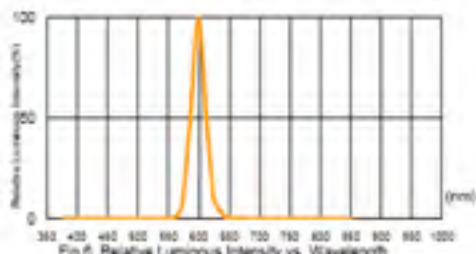


Fig.6 Relative Luminous Intensity vs. Wavelength

OPTeK reserves the right to make changes at any time in order to improve design and to supply the best product possible.

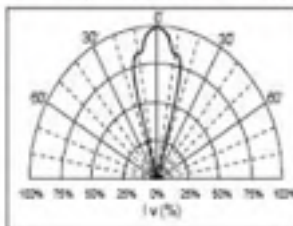
Round Through-Hole LED Lamp

OVLFx3C7 Series

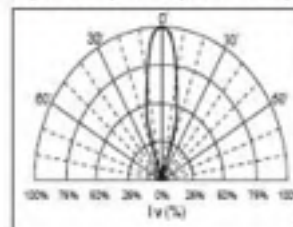


Beam Pattern

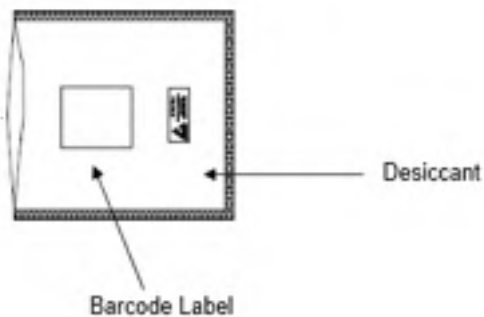
(RED) and (YELLOW)



(BLUE) and (GREEN)



Packaging: 500 pcs per bulk bag with desiccant



OPTEK reserves the right to make changes at any time in order to improve design and to supply the best product possible.



LEDRGBE

**Ultra Bright Red, Green,
and Blue LED**

Specifications and Documentation



Part 1. Introduction: LEDRGBE Red, Green, and Blue LED

The **LEDRGBE** emits light with spectral outputs centered at 620, 515, and 480 nm. This LED is composed of heterostructures (HS) grown on an InGaN substrate. The diode is encapsulated in a round clear epoxy casing with a 5 mm diameter.

Part 2. Specifications for an LEDRGBE

2.1. Electrical Specifications

| | Typical | Maximum Ratings |
|-------------------------------|---------------|------------------|
| Power Dissipation R/G/B | | 40/64/64 mW |
| Reverse Voltage | | 5.0 V |
| DC Forward Current | | 50 mA |
| Forward Voltage @ 20 mA R/G/B | 2.0/3.2/3.2 V | 2.4/3.6/3.6 V |
| Reverse Current $V_r = -5$ V | | 5 μ A |
| Operating Temperature | | -30 °C to 85 °C |
| Storage temperature Range | | -30 °C to 100 °C |

Note: All maximum measurements specified are at 25 °C.

2.2. Optical Specifications

| | Typical |
|---------------------------|---|
| Center Wavelength R/G/B | 627.5/525/467.5 nm ($\pm 8/\pm 10/\pm 8$ nm) |
| FWHM R/G/B | 20/36/15 nm |
| Half Viewing Angle | 25° |
| Total Optical Power R/G/B | 5.8/3.1/6.2 mW |

2.3. Soldering Specifications

| | Conditions |
|------------------|---|
| Manual Soldering | 295 °C \pm 5 °C , for less than 3 seconds |
| Wave Soldering | 260 °C \pm 5 °C , for less than 5 seconds |
| Reflow Soldering | Preheating: 70 °C to 80 °C , for 30 seconds Soldering: 245 °C \pm 5 °C , for less than 5 seconds |

2.4. Cleaning Solvents

| Solvent | Ethyl Alcohol | Isopropyl Alcohol | Propanol | Acetone | Chloroform | Trichloroethylene | NI45 |
|----------|---------------|-------------------|----------|---------|------------|-------------------|------|
| Approved | Yes | Yes | Yes | No | No | No | No |

2.5. Physical Specifications

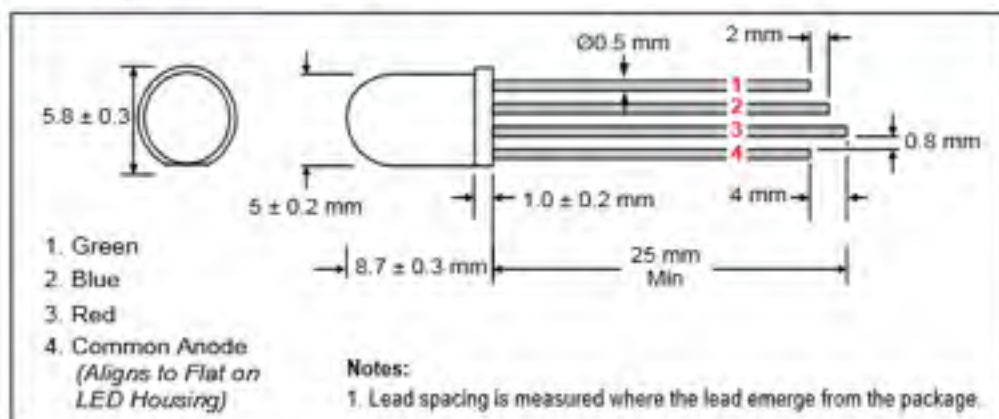
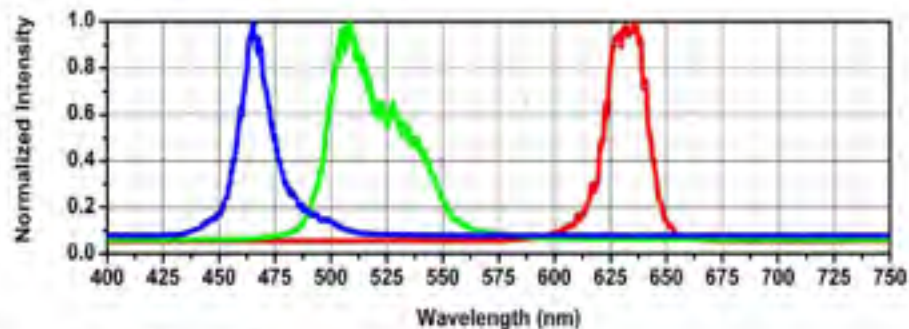
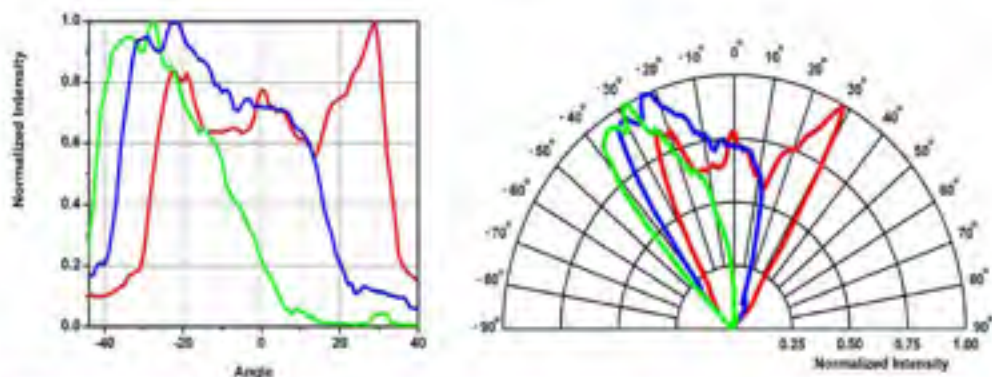


Figure 1: LEDRGBE Dimensional Drawing and PIN Out

2.6. Typical Spectral Intensity Distribution



2.7. Typical Radial Intensity Distribution





T-1 3/4 (5mm) SOL ID STATE LAMP

L039RC-E SUPER BRIGHT RED

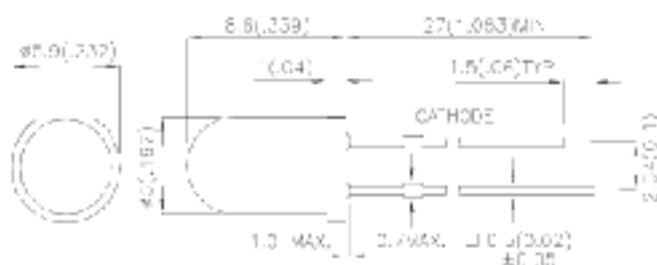
Features

- LOW POWER CONSUMPTION.
- 100 TO 100,000 HOURS OF LIFE.
- 100% RELIABILITY.
- RELIABLE AND RUGGED.
- LONG LIFE - SOLID STATE RELIABILITY.
- AVAILABLE ON TAPE AND REEL.

Description

The Super Bright Red source color devices are made with Titanium Aluminum Arsenide (Tea) Light Emitting Diode.

Package Dimensions



References

1. All members are in full date in debt.
2. Tolerance is all $20(10^{-1})$ in sea-bumbe number
3. Local species is measured above the local average package
4. Some fractions are subject to change with all noise

Kingbright

Selection Guide

| Part No. | Dice | Lens Type | Intensity (@20mA) | | Viewing Angle |
|-----------|---------------------------|-------------|----------------------|------|------------------|
| | | | Min | Typ | |
| L-53SRC-E | SUPER BRIGHT RED (GaAlIn) | WATER CLEAR | 1800 | 3800 | 30° |

NOTE

1. 30° is the angle from optical centerline where the intensity is 1/10 the optical centerline value.

Electrical / Optical Characteristics at $T_A = 25^\circ\text{C}$

| Symbol | Parameter | Device | Typ. | Max. | Units | Test Conditions |
|------------------|--------------------------|------------------|------|------|---------------|--------------------------------------|
| λ_p | Peak Wavelength | Super Bright Red | 660 | | nm | $I_F = 20\text{mA}$ |
| λ_U | Dominate Wavelength | Super Bright Red | 660 | | nm | $I_F = 20\text{mA}$ |
| λ_{SH-2} | Spectral Line Half Width | Super Bright Red | 20 | | nm | $I_F = 20\text{mA}$ |
| C_T | Capacitance | Super Bright Red | 45 | | pF | $V_F = 0.7\text{V}, f = 1\text{MHz}$ |
| V_F | Forward Voltage | Super Bright Red | 1.55 | 2.0 | V | $I_F = 20\text{mA}$ |
| I_R | Reverse Current | Super Bright Red | | 10 | μA | $V_R = 5\text{V}$ |

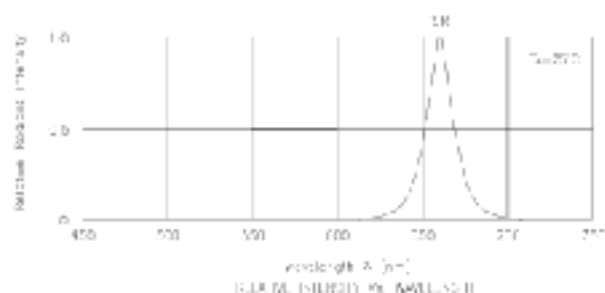
Absolute Maximum Ratings at $T_A = 25^\circ\text{C}$

| Parameter | Super Bright Red | Units |
|-------------------------------|--|-------|
| Power dissipation | 100 | mW |
| DC Forward Current | 30 | mA |
| Peak Forward Current (1) | 100 | mA |
| Reverse Voltage | 5 | V |
| Operating/Storage Temperature | -40°C To $+85^\circ\text{C}$ | |
| Lead Solder Temperature (2) | 250°C For 60 Seconds | |

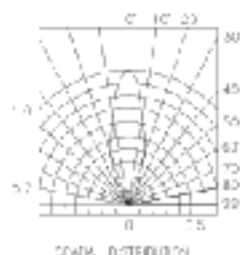
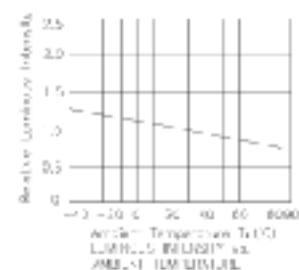
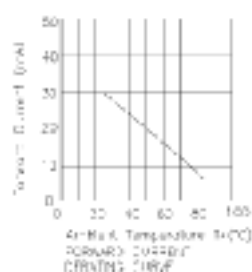
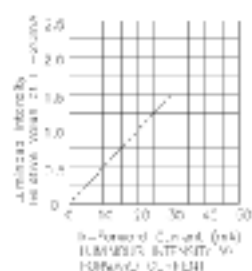
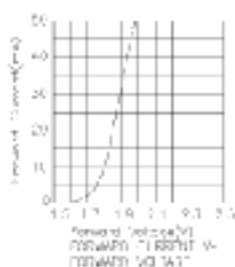
Notes:

1. 50% Duty Cycle, 0.1ms Pulse Width.
2. 3mm below previous level.

Kingbright



Super Bright Red L635HC-E




ROITHNER LASERTECHNIK GmbH

WIEDNER HAUPTSTRASSE 76

1040 VIENNA

AUSTRIA

TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM



LED680-series



TECHNICAL DATA

Visible LED

AlGaAs

LED680-series are AlGaAs LEDs mounted on a lead frame and encapsulated in various types of epoxy lens, which offers different design settings.

On forward bias, it emits a high power radiation of typical 4 mW at a peak wavelength at 680 nm.

Specifications

- Structure: AlGaAs
- Peak Wavelength: typ. 680 nm
- Optical Output Power: typ. 4 mW
- Resin Material: Epoxy resin
- Solder: Lead free



Absolute Maximum Ratings ($T_a=25^\circ\text{C}$)

| Type | Symbol | Value | Unit |
|------------------------------------|-----------|--------------|------------------|
| Power Dissipation | P_D | 110 | mW |
| Forward Current | I_F | 50 | mA |
| Pulse Forward Current | I_{FP} | 200 | mA |
| Reverse Voltage | V_R | 5 | V |
| Operating Temperature | T_{OP} | -30 ... +85 | $^\circ\text{C}$ |
| Storage Temperature | T_{STG} | -40 ... +100 | $^\circ\text{C}$ |
| Soldering Temperature (for 5 sec.) | T_{SOL} | 265 | $^\circ\text{C}$ |

Electro-Optical Characteristics ($T_a=25^\circ\text{C}$)

| Item | Symbol | Condition | Min. | Typ. | Max. | Unit |
|-----------------|-----------------|-----------------------|------|------|------|---------------|
| Forward Voltage | V_F | $I_F = 20 \text{ mA}$ | - | 1.8 | 2.3 | V |
| Reverse Current | I_R | $V_R = 5 \text{ V}$ | - | - | 10 | μA |
| Radiated Power | P_O | $I_F = 20 \text{ mA}$ | 3 | 4 | - | mW |
| Peak Wavelength | λ_P | $I_F = 20 \text{ mA}$ | - | 680 | - | nm |
| Half Width | $\Delta\lambda$ | $I_F = 20 \text{ mA}$ | - | 25 | - | nm |
| Rise Time | t_r | $I_F = 20 \text{ mA}$ | - | 50 | - | ns |
| Fall Time | t_f | $I_F = 20 \text{ mA}$ | - | 25 | - | ns |



Characteristics of Radiant Intensity ($T_a=25^\circ\text{C}$)

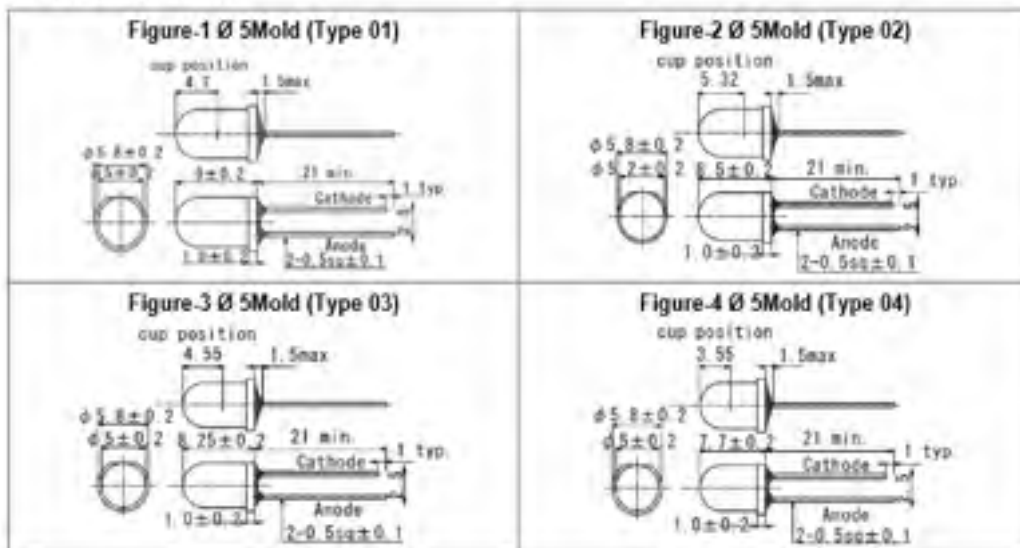
| Type | Viewing Half Angle | Brightness / Radiation Intensity ($I_e = 20 \text{ mA}$) | | | Outer Dimension | Dimension Figure |
|-------------|------------------------|--|------|------|-----------------|------------------|
| | | [Unit: mW/sr] | | | | |
| | | | Typ. | | | |
| LED680-01AU | $\pm 10^\circ$ | | 25 | | $\varnothing 5$ | 1 |
| LED680-02AU | $\pm 7^\circ$ | | 25 | | $\varnothing 5$ | 2 |
| LED680-03AU | $\pm 10^\circ$ | | 25 | | $\varnothing 5$ | 3 |
| LED680-04AU | $\pm 20^\circ$ | | 10 | | $\varnothing 5$ | 4 |
| LED680-05AU | $\pm 40^\circ$ | | 2 | | $\varnothing 5$ | 5 |
| LED680-06AU | $\pm 7^\circ$ | | 25 | | $\varnothing 5$ | 6 |
| LED680-09AU | $\pm 25^\circ$ (long) | | 10 | | $\varnothing 5$ | 7 |
| | $\pm 15^\circ$ (short) | | | Oval | | |
| LED680-46AU | | | | | $\varnothing 5$ | 8 |
| LED680-41AU | $\pm 16^\circ$ | | 20 | | $\varnothing 4$ | 9 |
| LED680-42AU | $\pm 23^\circ$ | | 10 | | $\varnothing 4$ | 10 |
| LED680-31AU | | | | | $\varnothing 3$ | 11 |
| LED680-33AU | $\pm 18^\circ$ | | 10 | | $\varnothing 3$ | 12 |
| LED680-34AU | | | | | $\varnothing 3$ | 13 |
| LED680-36AU | $\pm 33^\circ$ | | 4 | | $\varnothing 3$ | 14 |

* Radiant Power is measured by Photodyne #200

* Brightness is measured by Tektronix J-16

The above specifications are for reference purpose only and subjected to change without prior notice.

Outer Dimensions

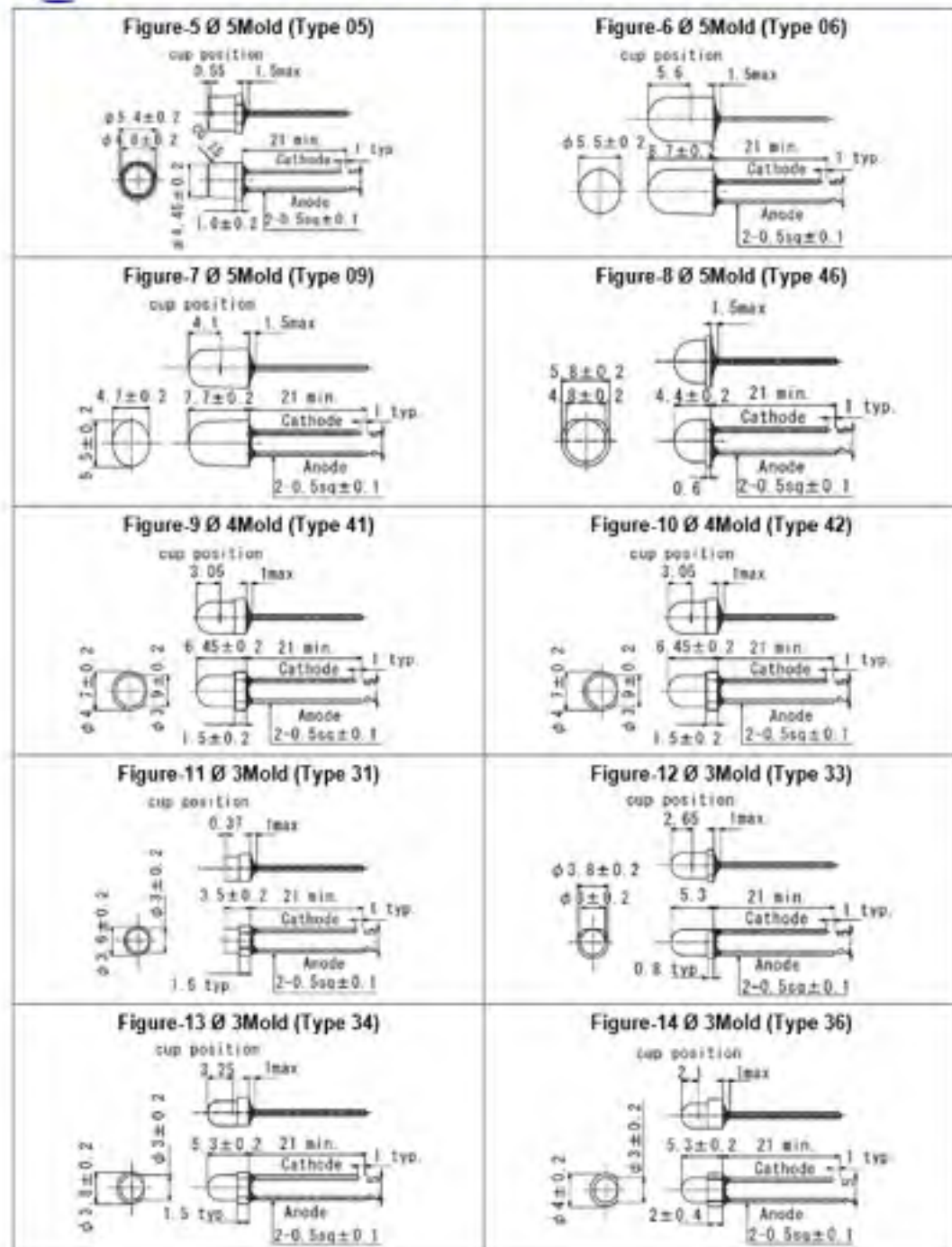



ROITHNER LASERTECHNIK GmbH

 WIEDNER HAUPTSTRASSE 76
 TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM

1040 VIENNA

AUSTRIA





ROITHNER LASERTECHNIK GmbH

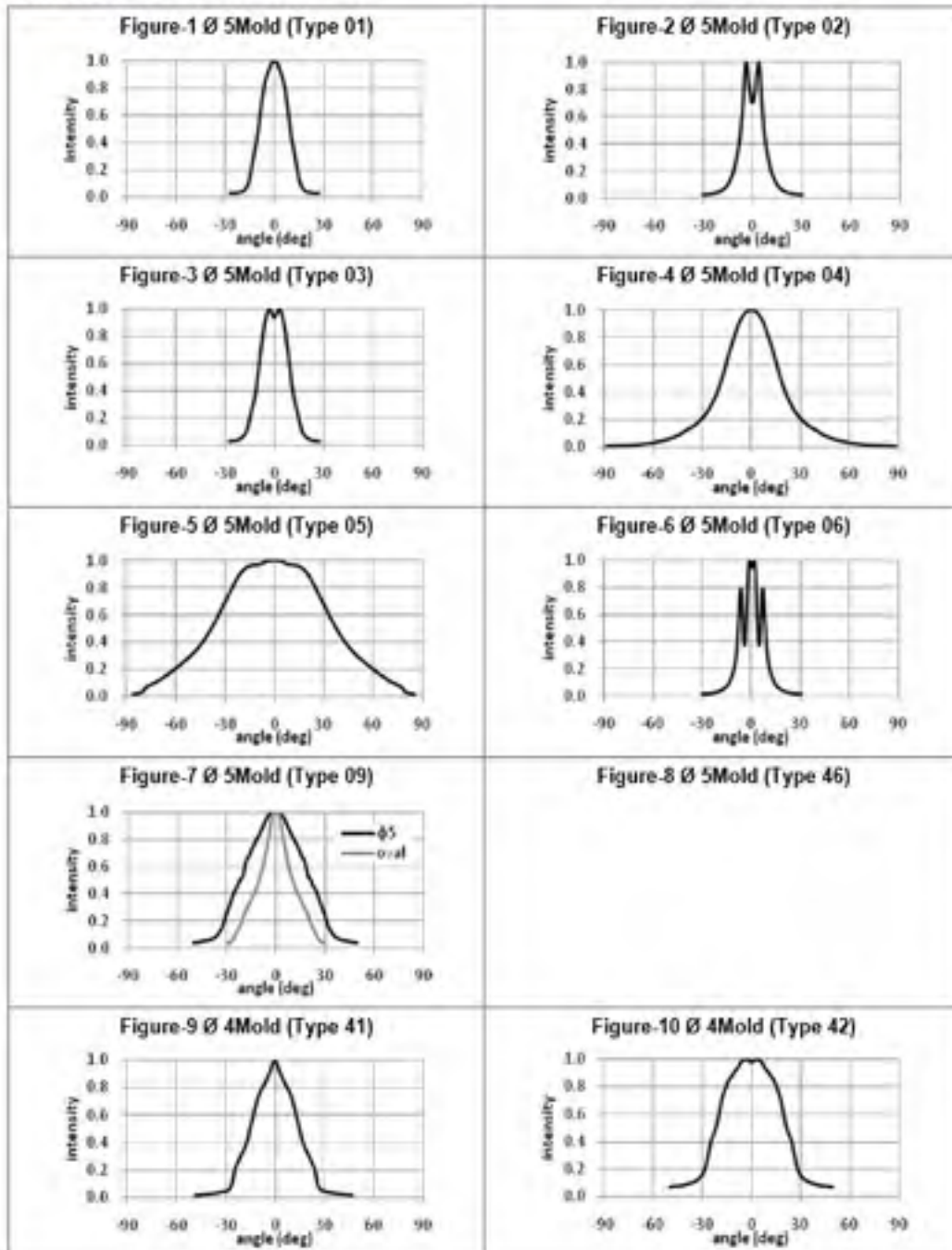
WIENER HAUPTSTRASSE 76
TEL. +43 1 586 52 43 -0. FAX. -44. OFFICE@ROITHNER-LASER.COM

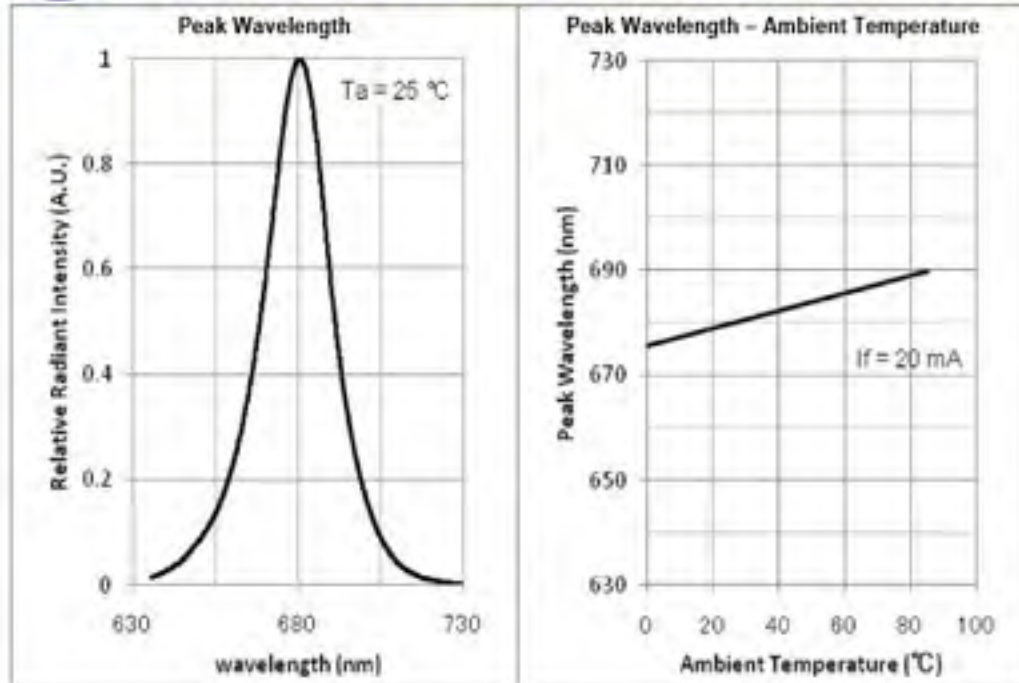
1040 VIENNA

AUSTRIA



Viewing half angle





Precaution for Use

1. Cautions

- DO NOT look directly into the emitted light or look through the optical system. To prevent in adequate exposure of the radiation, wear protective glasses.
- The LEDs are emitting invisible light.

2. Lead Forming

- When forming leads, the leads should be bent at a point at least 3 mm from the base of the lead. DO NOT use the base of the leadframe as a fulcrum during lead forming.
- Lead forming should be done before soldering.
- DO NOT apply any bending stress to the base of the lead. The stress to the base may damage the LED's characteristics or it may break the LEDs.
- When mounted the LEDs onto the printed circuit board, the holes on the circuit board should be exactly aligned with the leads of LEDs. If the LEDs are mounted with stress at the leads, it causes deterioration of the lead and it will degrade the LEDs.



LED - Lamp

ELD-720-524

| Radiation | Type | Technology | Case |
|-----------|------|---------------|-------------------|
| Infrared | DDH | AlGaAs/AlGaAs | 5 mm plastic lens |

| Description | |
|---|--|
| <p>High-power, high-speed, double heterostructure with removed substrate, chip with central contact, housing without standoff leads</p> | |
| <p>Note: Special packages without standoff available on request</p> | |
| Applications | |
| <p>Optical communications, safety equipment, automation</p> | |

Technical drawing of the DDH package showing side and top views with dimensions:

- Side View:**
 - Overall length: 36.5 ± 0.4
 - Mounting tab width: 3.0
 - Mounting tab height: 2.54
 - Chip length: 6.15
 - Chip width: 1.0
- Top View:**
 - Overall width: 12.5
 - Chip width: 6.75
 - Mounting tab width: 2.54
 - Mounting tab height: 2.54
 - Chip height: 2.54

Maximum Ratings

$T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified

| Parameter | Test conditions | Symbol | Value | Unit |
|-----------------------------|---|-----------|-------------|------|
| Forward current (DC) | | I_F | 50 | mA |
| Peak forward current | ($t_p \leq 50 \mu s$, $t_p/T = 1/2$) | I_{FM} | 100 | mA |
| Operating temperature range | | T_{amb} | -40 to +85 | °C |
| Storage temperature range | | T_{stg} | -55 to +100 | °C |

Optical and Electrical Characteristics

T_{amb} = 25°C, unless otherwise specified

| Parameter | Test conditions | Symbol | Min | Typ | Max | Unit |
|--------------------------------|-------------------------|-----------------------|-----|-----|-----|-------|
| Forward voltage ¹ | $I_f = 50 \text{ mA}$ | V_f | | 2.0 | 2.4 | V |
| Reverse voltage | $I_R = 100 \mu\text{A}$ | V_R | 5V | | | V |
| Radiant power ¹ | $I_f = 50 \text{ mA}$ | Φ_e | 8 | 10 | | mW |
| Radiant intensity ¹ | $I_f = 50 \text{ mA}$ | I_e | 40 | 70 | | mW/sr |
| Peak wavelength | $I_f = 20 \text{ mA}$ | λ_p | 710 | 720 | 730 | nm |
| Spectral bandwidth at 50% | $I_f = 20 \text{ mA}$ | $\Delta\lambda_{0.5}$ | | 30 | | nm |
| Viewing angle | $I_f = 50 \text{ mA}$ | 2θ | | 20 | | deg. |
| Switching time | $I_f = 50 \text{ mA}$ | t_r, t_f | | 40 | | ns |

for information only



ROITHNER LASERTECHNIK

Wiedner Hauptstraße 76, A-1040 Vienna, Austria
Tel: ++43 1 586 52 43-0, Fax: -44, office@roithner-laser.com



LED780-xxAU Infrared LED Lamp

is a GaAlAs LED mounted on a lead frame and encapsulated in various types of epoxy lens which offer different design settings. On forward bias, it emits a high power radiation of typical 18mW with a peak wavelength at 780nm.

1) Specifications

- | | |
|---------------------|-------------------|
| (1) Chip material | AlGaAs |
| (2) Peak wavelength | 780nm |
| (3) Package | Clear epoxy resin |
| (4) Lead frame | Soldered |

2) Absolute Maximum Ratings

| Item | Symbol | Maximum Rated Value | Unit | Ambient Temperature |
|-----------------------|--------|---------------------|------|---------------------|
| Power Dissipation | PD | 190 | mW | Ta=25°C |
| Forward Current | IF | 100 | mA | Ta=25°C |
| Pulse Forward Current | IFP | 500 | mA | Ta=25°C |
| Reverse Voltage | VR | 5 | V | Ta=25°C |
| Operating Temperature | TOPR | -30 ~ +65 | °C | Ta=25°C |
| Storage Temperature | TSTG | -30 ~ +100 | °C | |
| Soldering Temperature | TSOL | 260 | °C | |

3) Electro-Optical Characteristics (Ta=25°C)

| Item | Symbol | Condition | Minimum | Typical | Maximum | Unit |
|----------------------|--------|-----------|---------|---------|---------|------|
| Forward Voltage | VF | IF=50mA | | 1.75 | 1.95 | V |
| Reverse Current | IR | VR=5V | | | 10 | µA |
| Total Radiated Power | PO | IF=50mA | 13.0 | 18.0 | | mW |
| Peak Wavelength | λP | IF=50mA | | 780 | | nm |
| Half Width | Δλ | IF=50mA | | 30 | | nm |
| Rise Time | tr | IF=50mA | | 80 | | ns |
| Fall Time | tf | IF=50mA | | 80 | | ns |

4) Characteristics of Radiant Intensity (Ta=25°C)

| Type | Viewing Half Angle | Radiant Intensity IF=50mA unit: mW/sr | | | Outer Dimension | |
|-----------|-----------------------------|---------------------------------------|---------|---------|-----------------|--------|
| | | Minimum | Typical | Maximum | Dimension | Figure |
| L780-01AU | ±10° | | 90 | | Φ5 | 1 |
| L780-02AU | ±5° | | 100 | | Φ5 | 2 |
| L780-03AU | ±15° | | 70 | | Φ5 | 3 |
| L780-04AU | ±20° | | 35 | | Φ5 | 4 |
| L780-05AU | ±40° | | 10 | | Φ5 | 5 |
| L780-06AU | ±5° | | 110 | | Φ5 | 6 |
| L780-09AU | ±25° (Long) ±15° (Short) | | 60 | | Φ6 Oval | 7 |
| L780-31AU | | | | | Φ3 | 8 |
| L780-33AU | ±15° | | 40 | | Φ3 | 9 |
| L780-34AU | | | | | Φ3 | 10 |
| L780-36AU | ±30° | | 20 | | Φ3 | 11 |
| L780-41AU | | | | | Φ4 | 12 |
| L780-42AU | | | | | Φ4 | 12 |

‡ Radiant Intensity is measured by Tektronix J-16.

‡ Total Radiated Power is measured by Photodiode #500.


ROITHNER LASERTECHNIK GmbH

 WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA
 TEL. +43 1 506 52 43 -0. FAX. -44. OFFICE@ROITHNER-LASER.COM


LED820-series



TECHNICAL DATA

Infrared LED

AlGaAs

LED820-series are AlGaAs LEDs mounted on a lead frame and encapsulated in various types of epoxy lens, which offers different design settings.
 On forward bias, it emits a high power radiation of typical 18 mW at a peak wavelength at 820 nm.

Specifications

- Structure: AlGaAs
- Peak Wavelength: typ. 820 nm
- Optical Output Power: typ. 18 mW
- Resin Material: Epoxy resin
- Solder: Lead free



Absolute Maximum Ratings ($T_a=25^\circ\text{C}$)

| Type | Symbol | Value | Unit |
|------------------------------------|-----------|--------------|------------------|
| Power Dissipation | P_D | 170 | mW |
| Forward Current | I_F | 100 | mA |
| Pulse Forward Current | I_{FP} | 500 | mA |
| Reverse Voltage | V_R | 5 | V |
| Operating Temperature | T_{OP} | -30 ... +85 | $^\circ\text{C}$ |
| Storage Temperature | T_{STG} | -40 ... +100 | $^\circ\text{C}$ |
| Soldering Temperature (for 5 sec.) | T_{SOL} | 265 | $^\circ\text{C}$ |

Electro-Optical Characteristics ($T_a=25^\circ\text{C}$)

| Item | Symbol | Condition | Min. | Typ. | Max. | Unit |
|-----------------|-----------------|-----------------------|------|------|------|---------------|
| Forward Voltage | V_F | $I_F = 50 \text{ mA}$ | - | 1.6 | 1.8 | V |
| Reverse Current | I_R | $V_R = 5 \text{ V}$ | - | - | 10 | μA |
| Radiated Power | P_O | $I_F = 50 \text{ mA}$ | 16 | 18 | - | mW |
| Peak Wavelength | λ_P | $I_F = 50 \text{ mA}$ | 805 | 820 | 835 | nm |
| Half Width | $\Delta\lambda$ | $I_F = 50 \text{ mA}$ | - | 35 | - | nm |
| Rise Time | t_r | $I_F = 50 \text{ mA}$ | - | 50 | - | ns |
| Fall Time | t_f | $I_F = 50 \text{ mA}$ | - | 25 | - | ns |


ROITHNER LASERTECHNIK GmbH

WIEDNER HAUPTSTRASSE 76

1040 VIENNA

AUSTRIA

TEL. +43 1 586 52 43 -O. FAX. -44. OFFICE@ROITHNER-LASER.COM

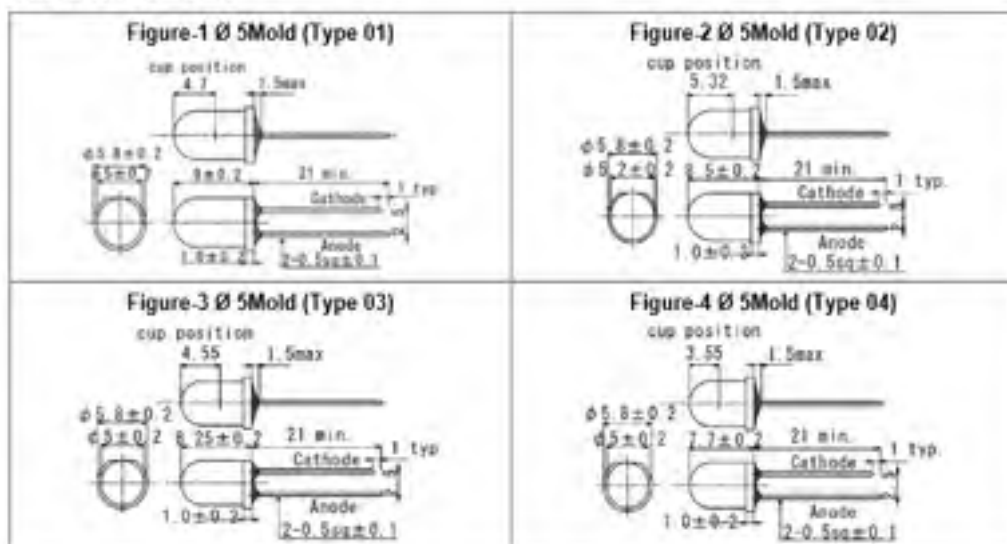

Characteristics of Radiant Intensity ($T_a=25^\circ\text{C}$)

| Type | Viewing Half Angle | Brightness / Radiation Intensity ($I_v = 50 \text{ mA}$) | | | Outer Dimension | Dimension Figure |
|-------------|------------------------|--|------|------|-----------------|------------------|
| | | [Unit: mW/sr] | | | | |
| | | | Typ. | | | |
| LED820-01AU | $\pm 10^\circ$ | | 100 | | $\varnothing 5$ | 1 |
| LED820-02AU | $\pm 7^\circ$ | | 100 | | $\varnothing 5$ | 2 |
| LED820-03AU | $\pm 10^\circ$ | | 110 | | $\varnothing 5$ | 3 |
| LED820-04AU | $\pm 20^\circ$ | | 45 | | $\varnothing 5$ | 4 |
| LED820-05AU | $\pm 40^\circ$ | | 12 | | $\varnothing 5$ | 5 |
| LED820-06AU | $\pm 7^\circ$ | | 130 | | $\varnothing 5$ | 6 |
| LED820-09AU | $\pm 25^\circ$ (long) | | 60 | | $\varnothing 5$ | 7 |
| | $\pm 15^\circ$ (short) | | | Oval | | |
| LED820-46AU | | | | | $\varnothing 5$ | 8 |
| LED820-41AU | $\pm 16^\circ$ | | 75 | | $\varnothing 4$ | 9 |
| LED820-42AU | $\pm 23^\circ$ | | 40 | | $\varnothing 4$ | 10 |
| LED820-31AU | | | | | $\varnothing 3$ | 11 |
| LED820-33AU | $\pm 18^\circ$ | | 45 | | $\varnothing 3$ | 12 |
| LED820-34AU | | | | | $\varnothing 3$ | 13 |
| LED820-36AU | $\pm 33^\circ$ | | 20 | | $\varnothing 3$ | 14 |

* Radiant Power is measured by Photodyne #500

* Brightness is measured by TekTronix J-16

The above specifications are for reference purpose only and subjected to change without prior notice

Outer Dimensions




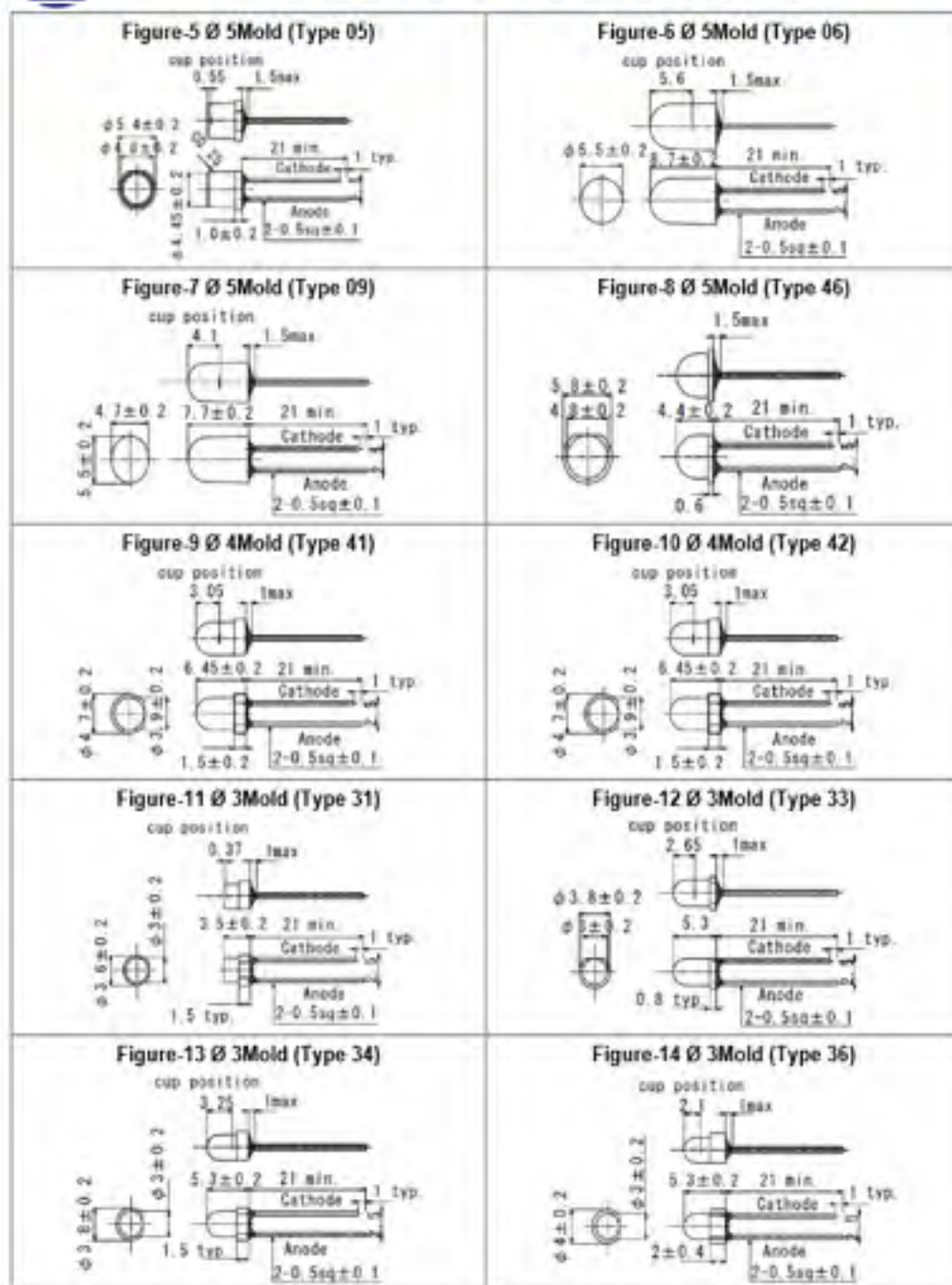
ROITHNER LASERTECHNIK GmbH

WIEDNER HAUPTSTRASSE 76

1040 VIENNA

AUSTRIA

TEL. +43 1 586 52 43 -O. FAX. -44. OFFICE@ROITHNER-LASER.COM




ROITHNER LASERTECHNIK GmbH

WIEDNER HAUPTSTRASSE 76

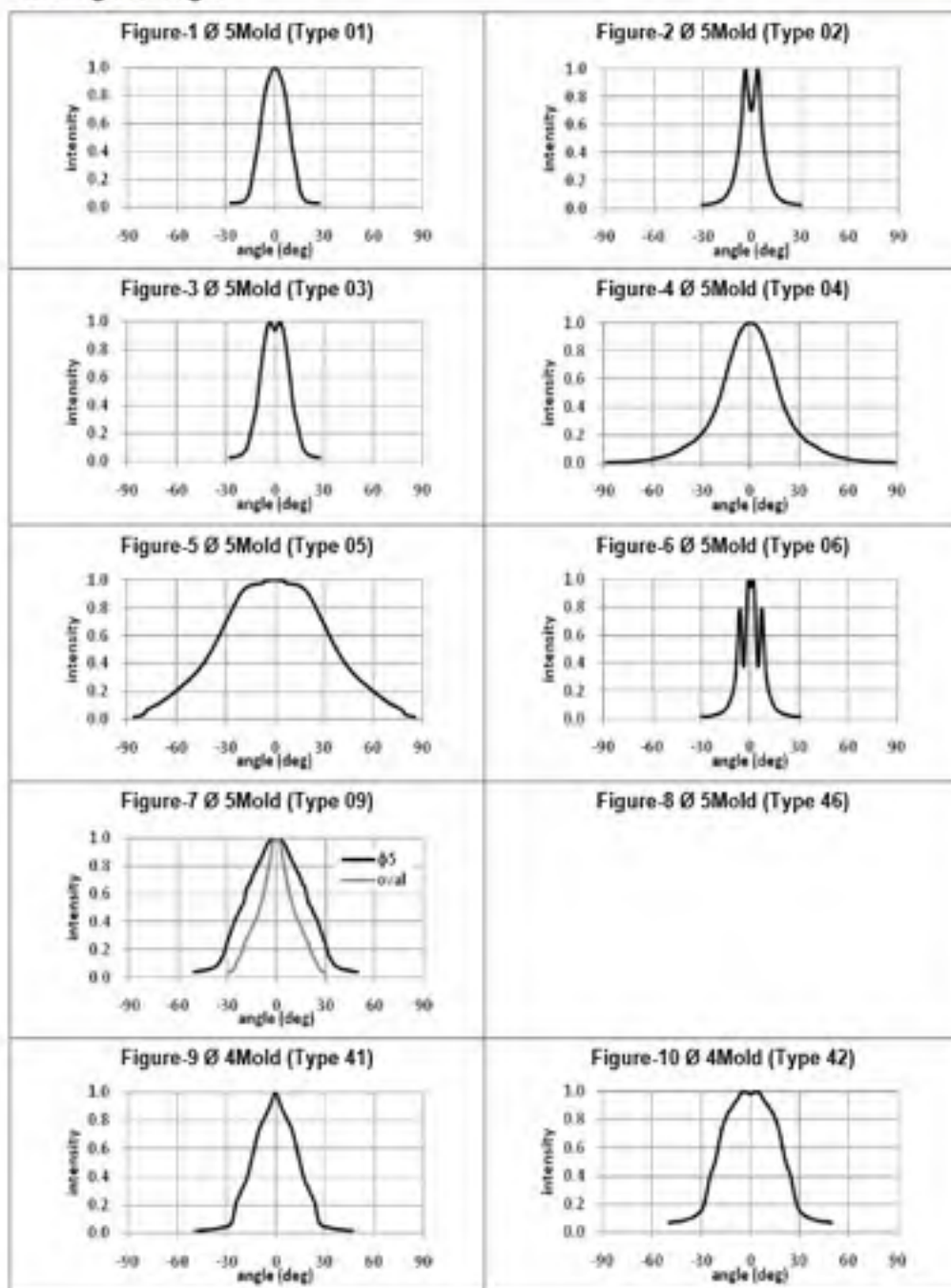
1040 VIENNA

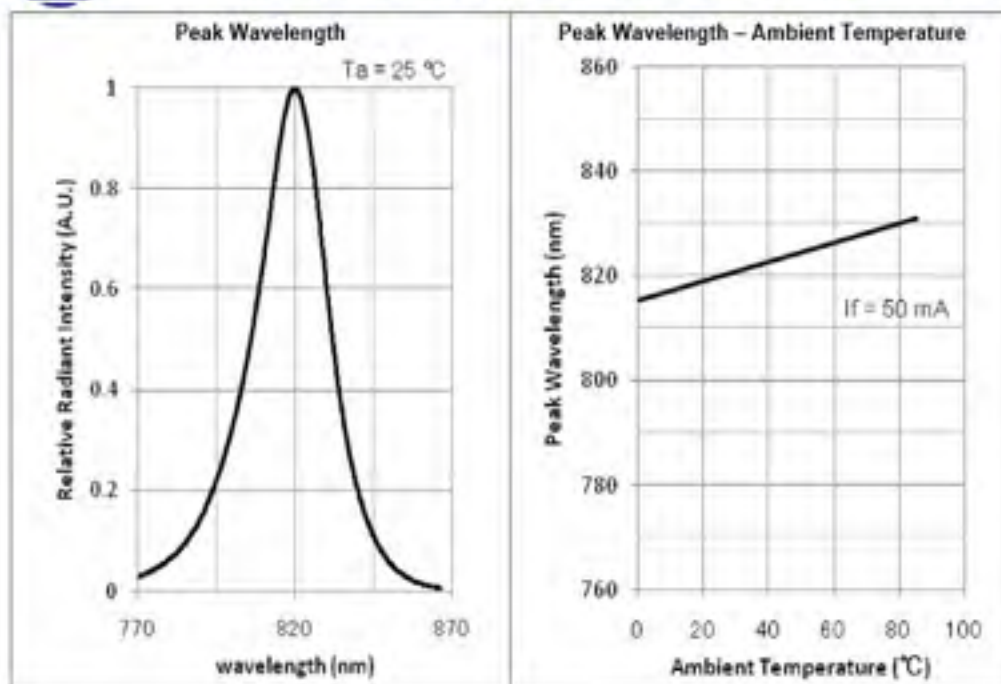
AUSTRIA

TEL. +43 1 586 52 43 -O. FAX. -44. OFFICE@ROITHNER-LASER.COM



Viewing half angle





Precaution for Use

1. Cautions

- DO NOT look directly into the emitted light or look through the optical system. To prevent in adequate exposure of the radiation, wear protective glasses.
- The LEDs are emitting invisible light.

2. Lead Forming

- When forming leads, the leads should be bent at a point at least 3 mm from the base of the lead. DO NOT use the base of the leadframe as a fulcrum during lead forming.
- Lead forming should be done before soldering.
- DO NOT apply any bending stress to the base of the lead. The stress to the base may damage the LED's characteristics or it may break the LEDs.
- When mounted the LEDs onto the printed circuit board, the holes on the circuit board should be exactly aligned with the leads of LEDs. If the LEDs are mounted with stress at the leads, it causes deterioration of the lead and it will degrade the LEDs.


ROITHNER LASERTECHNIK GmbH

 WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA
 TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM


W54L5111P



TECHNICAL DATA

White LED 5 mm, InGaN

Features

- High Luminous LEDs
- 5mm Round Standard Directivity
- Long Lifetime Operation
- Superior Weather-resistance
- UV Resistant Epoxy
- Water Clear Type

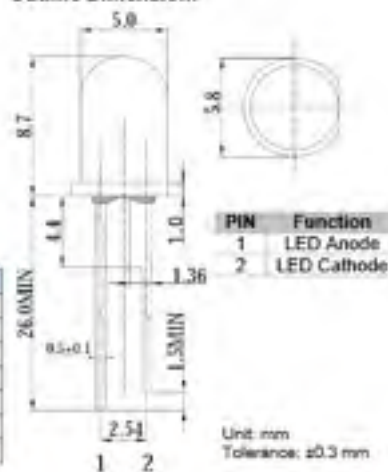
Applications

- Automotive Dashboard Lighting
- Small Area Illuminations
- Back Lighting
- Other Lighting

Directivity:



Outline Dimension:



Absolute Maximum Ratings ($T_a=25^\circ\text{C}$)

| Item | Symbol | Value | Unit |
|--------------------------------|-----------|------------------|------------------|
| Power Dissipation | P_D | 190 | mW |
| Forward Current | I_F | 50 | mA |
| Pulse Forward Current * | I_{Fp} | 120 | mA |
| Reverse Voltage | V_R | 5 | V |
| Operating Temperature | T_{op} | $-30 \dots +85$ | $^\circ\text{C}$ |
| Storage Temperature | T_{stg} | $-40 \dots +100$ | $^\circ\text{C}$ |
| Soldering Temperature (5 sec.) | T_{sol} | 260 | $^\circ\text{C}$ |

* pulse width max. 10 ms, duty ratio max. 1/10

Specifications ($T_a=25^\circ\text{C}$)

| Item | Condition | Symbol | Min. | Typ. | Max. | Unit |
|----------------------------------|-----------------------|-----------------|------|------|------|---------------|
| Optical Specifications | | | | | | |
| Luminous Intensity * | $I_F = 50 \text{ mA}$ | I_V | 60 | 75 | - | cd |
| Chromaticity | $I_F = 50 \text{ mA}$ | x | - | 0.27 | - | |
| Coordinates ** | $I_F = 50 \text{ mA}$ | y | - | 0.28 | - | |
| Viewing Angle | $I_F = 50 \text{ mA}$ | $2\theta_{1/2}$ | - | 15 | - | deg |
| Electrical Specifications | | | | | | |
| Forward Voltage | $I_F = 50 \text{ mA}$ | U_F | 3.0 | 3.3 | 3.8 | V |
| Reverse Voltage | $U_R = 5 \text{ V}$ | U_R | - | - | 10 | μA |

* Tolerance of chromaticity coordinates is $\pm 10\%$

** Tolerance of luminous intensity is $\pm 15\%$


ROITHNER LASERTECHNIK GmbH

 WEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA
 TEL. +43 1 586 52 43 -0. FAX: +43 1 586 52 43 -44. OFFICE@ROITHNER-LASER.COM


Precaution for Use

1. Cautions

- DO NOT look directly into the light or look through the optical system.

2. Lead Forming

- When forming leads, the leads should be bent at a point at least 3 mm from the base of the lead. DO NOT use the base of the leadframe as a fulcrum during lead forming.
- Lead forming should be done before soldering.
- DO NOT apply any bending stress to the base of the lead. The stress to the base may damage the LED's characteristics or it may break the LEDs.
- When mounted the LEDs onto the printed circuit board, the holes on the circuit board should be exactly aligned with the leads of LEDs. If the LEDs are mounted with stress at the leads, it causes deterioration of the lead and it will degrade the LEDs.

3. Soldering Conditions

- Solder the LEDs no closer than 3 mm from the base of the lead.

- Recommended soldering conditions:

| Dip Soldering | |
|-------------------------|--|
| Pre-Heat | 120 °C Max. |
| Pre-Heat Time | 60 Seconds Max. |
| Solder Bath Temperature | 260 °C Max. |
| Dipping Time | 5 Seconds Max. |
| Dipping Position | No lower than 3 mm from the base of the epoxy bulb |

- DO NOT apply any stress to the lead particularly when heat.
- The LEDs must not be reposition after soldering.
- After soldering the LEDs, the lead should be protected from mechanical shock or vibration until the LEDs return to room temperature.
- When it is necessary to clamp the LEDs to prevent soldering failure, it is important to minimize the mechanical stress on the LEDs.
- Cut the LED leads at room temperature. Cutting the leads at high temperature may cause the failure of the LEDs.

4. Static Electricity

- The LEDs are very sensitive to Static Electricity and surge voltage. So it is recommended that a wrist band or an anti-electrostatic glove be used when handling the LEDs.
- All devices, equipment and machinery must be grounded properly. It is recommended that precautions should be taken against surge voltage to the equipment that mounts the LEDs.



5. Heat Generation

- The powered LEDs generate heat. Heat dissipation should be considered in the application design to avoid the environmental conditions for operation in excess of the absolute maximum ratings.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Applied Optix. 2014. « ASTM / IEC / JIS Standards ». *SOLARLUX*.
- ASTM I. 2010. *Standard specification for solar simulation for photovoltaic testing*. Designation. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States: ASTM International,
- Baniya, Rupak Raj. 2012. *Study of various metrics evaluating color quality of light sources*. En ligne <<https://aaltodoc.aalto.fi:443/handle/123456789/5176>>. Consulté le 15 november 2013.
- Benoit, Alexandre. 2007. « Le système visuel humain au secours de la vision par ordinateur ». Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, February 14. En ligne <<http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00193715>>. Consulté le 15 november 2013.
- Bouaraba, Fazia. 2012. « Etude d'une LED blanche à base d'InGaN pour l'émission de la lumière blanche ». Masters, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou - Faculté de génie électrique et d'informatique - Département d'électronique.
- C. Baillet. 2005. « Photométrie ».
- Chalmers, Andrew and Snjezana Soltic. 2010. « Towards the Optimum Light Source Spectrum ». *Advances in OptoElectronics*, vol. 2010 (July 14). En ligne <<http://www.hindawi.com/journals/aoe/2010/596825/abs/>>. Consulté le 15 november 2013.
- Chherawala, Youssef. 2007. « Prédiction de la teneur en anthocyane du fruit de la canneberge par vision par ordinateur ». Masters, Montréal, École de technologie supérieure, June 27, 240 p. En ligne <<http://espace.etsmtl.ca/567/>>. Consulté le 15 november 2013.
- CIE. 1986c. *CIE standards illuminant for colorimetry*. Technical. Vienna, AUSTRIA. En ligne <www.cie.org>.
- CIE. 1999. *Colour rendering (TC 1-33 closing remarks)*. Rapport Technique. CIE Central Bureau : Commission Internationale de l'Éclairage.
- CIE. 2004. *Colorimetry*. Vienna : CIE, Central Bureau.
- CIE. 2007. *Color Rendering of White LED Light Sources*. Technical. Vienna, AUSTRIA: Commission Internationale de l'Éclairage.
- CIE. 2013. *Methods for re-defining CIE D illuminants*. Technical. Vienna, AUSTRIA: Commission Internationale de l'Éclairage.

- Commission Supérieure Technique de l'Image et du Son. 1998. « Introduction à la colorimétrie (2 ème partie) ».
- CVRL. 2013. « CIE 2006 “physiologically-relevant” LMS functions ». University. *Colour & Vision Research Laboratory*. En ligne <<http://www.cvrl.org/>>.
- Dangol, Rajendra. 2011. *Colour Rendering Index and colour rendering of LEDs*. En ligne <<https://aaltodoc.aalto.fi:443/handle/123456789/3662>>. Consulté le 15 november 2013.
- Davis and al., W. and Y. 2004. « Development of a Color Quality Scale ». National Institute of Standards and Technology. En ligne. Consulté le 12 december 2002.
- Dean, B. and al. 1964. « Spectral Distribution of Typical Daylight as a Function of Correlated Color Temperature ». *Journal of the Optical Society of America (1917-1983)*.
- Dick Erdmann. « Color Rendering Index (CRI) ». En ligne. Consulté le 20 juin 2013.
- E. Fred Schubert. 2006. *Light-Emitting Diodes*. 2nd Édition. New York: Cambridge University Press, 415 p. En ligne <www.cambridge.org>.
- Gillet, Steve. 2008. « Colorimétrie ». En ligne <www.isipack.be>. Consulté le 6 february 2013.
- Guillo, Stéphane. 2004. « La balance des blancs: Réglages et effets de la balance des blancs ». École Nationale Supérieure Louis Lumière, 93 p.
- Hamadani, B. H. and al. 2011. « Towards realization of a large-area light-emitting-diode-based solar simulator ».
- Honsberg, Christiana and Stuart Bowden. 2013. « A collection of resources for the photovoltaic educator ». *PV EDUCATION*. En ligne <<http://pveducation.org/>>. Consulté le 14 february 2014.
- Huang, Chien-Hao and Teng-Ming Chen. 2011. « A Novel Single-Composition Trichromatic White-Light $\text{Ca}_3\text{Y}(\text{GaO})_3(\text{BO}_3)_4$: Ce^{3+} , Mn^{2+} , Tb^{3+} Phosphor for UV-Light Emitting Diodes ». *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 115, no 5 (February 10), p. 2349–2355. En ligne. Consulté le 13 december 2013.
- HunterLab. 2008. « Equivalent white light sources and CIE illuminants ».
- ISO TC 34/SC 12. 2007. *Sensory analysis - General guidance and test method for assessment of the colour of foods*. International Standard. Genève 20 - Switzerland: Multiple. Distributed through American National Standards Institute.

- Kosztzán, Z. and János Schanda. 2013. « Smoothing spectral power distribution of daylights », October.
- Kráncz, Balázs and János Schanda. 2000. « Reevaluation of daylight spectral distributions ». *Color Research & Application*, vol. 25, no 4, p. 250–259. En ligne. Consulté le 5 december 2013.
- Lam, Yuk-Ming and John H. Xin. 2002. « Evaluation of the quality of different D65 simulators for visual assessment ». *Color Research & Application*, vol. 27, no 4, p. 243–251. En ligne. Consulté le 14 november 2013.
- Liu, Sheng and Xiaobing Luo. 2011. *LED Packaging for Lighting Applications - Design, Manufacturing and Testing*. 1 st. Singapore: John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 349 p.
- Lumitronix. 2013. « LED blanches ». Commercial. *Lumitronix - High Performance LED Technologies & Solutions*. En ligne. Consulté le 20 november 2013.
- Meyaard, David S., Qifeng al, Jaehee al, E. Fred al, Sang-Heon al, Min-Ho al, Cheolsoo al, Seung Jae al and Jong Kyu al. 2012. « Temperature dependent efficiency droop in GaInN light-emitting diodes with different current densities ». *Applied Physics Letters*, vol. 100, no 8 (February 22), p. 081106. En ligne. Consulté le 4 february 2014.
- Mottier, Patrick. 2008. *Les diodes électroluminescentes pour l'éclairage*. 25 vols. Hermes. Hermes Science/Lavoisier entitled, 275 p. En ligne <www.hermes-science.com>.
- Mottier. 2009. *LEDs for Lighting Applications*. John Wiley & Sons (USA).
- Narukawa, Yukio, Masatsugu al., Daisuke al, Masahiko al and Takashi al. 2010. « White light emitting diodes with super-high luminous efficacy ». *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 43, no 35 (September 8), p. 354002. En ligne. Consulté le 15 january 2014.
- Newport. 2014a. « Class AAA Solar Simulators ». En ligne <<http://search.newport.com>>. Consulté le 26 january 2014.
- Newport. 2014b. « Introduction to Solar Radiation ». En ligne <<http://www.newport.com/Introduction-to-Solar-Radiation/411919/1033/content.aspx>>. Consulté le 27 january 2014.
- NIST. 2006. « Color rendering of light sources ». Vision Science.
- Schanda. János. 1998. « CIE Standards for assessing quality of light sources ». En ligne <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.42.3077&rep=rep1&type=pdf>>. Consulté le 14 november 2013.

- Schanda. 2003. « Photometry and colorimetry of LED lighting devices. Progress of automobile lighting (PAL) ». In Darsmtadt, Germany, 955 -63: The Society of light and Lighting (SAGE).
- Schanda. 2007. *COLORIMETRY - Understanding the CIE System*. A John Wiley & Sons, Inc., Publication. Wiley, 499 p.
- US-DOE. 2013. *Solid-State Lighting Research and Development - Multi-Year Program Plan*. US Department of Energy (DOE). En ligne. Consulté le 10 december 2013.
- Velay, B. 2011. « Sources de lumière ». IUT Saint Nazaire - Mesures Physiques - S3 - Optique & Optoélectronique.
- Wei, Minchen. 2011. « Effects of Spectral Modification on Perceived Brightness and Color Discrimination ». The Pennsylvania State University. En ligne <<https://etda.libraries.psu.edu/paper/12389/7702>>. Consulté le 15 november 2013.
- Wikipédia. 2014a. « Standard illuminant ». *Wikipedia, the free encyclopedia*. Canada. En ligne <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Standard_illuminant&oldid=589885532>. Consulté le 23 january 2014.
- Wikipédia. 2014b. « Solar simulator ». *Wikipedia, the free encyclopedia*. En ligne <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Solar_simulator&oldid=572416200>. Consulté le 27 january 2014.
- Yuji, Beijing. 2014. « High CRI LED Lighting Supplier ». En ligne <<http://www.yujiintl.com/high-cri-led-lighting>>. Consulté le 12 february 2014.

